土木建筑工程材料

（修订版）

主　编　赵方冉
副主编　阎西康
主　审　许炳权

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木建筑工程材料/赵方冉主编.—2版.—北京:
中国建材工业出版社,2003.1
ISBN 7-80159-400-2

Ⅰ.土… Ⅱ.赵… Ⅲ.土木工程—建筑材料—高等学校—教材 Ⅳ.TU5.

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第002465号

内 容 提 要

本书主要是为高等学校土木工程专业学生编写的教材。书中重点介绍了有关土木建筑工程材料的基础理论和基本知识。还介绍了土木建筑工程中常用的水泥、石灰、水泥混凝土与砂浆、沥青与沥青混合料、钢材、木材、石材及墙体材料,土建工程中常用的防水材料、装饰材料、有机高分子材料、新型人造材料以及未来绿色建筑材料的有关知识。此外,书中也介绍了土木工程常见的材料试验方法和材料质量评定方法。

本书适于普通高等学校、成人高校土木工程专业的教学,也适于作为其它土建类专业继续教育的教材。本书对正在从事土建工程的技术人员和管理人员也适合作为专业参考书。

土木建筑工程材料

主 编 赵方冉

副主编 阎西康

主 审 许炳权

*

中国建材工业出版社出版

(北京海淀区三里河路11号 邮政编码:100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15 字数:366千字

2003年1月第二版 2003年1月第一次印刷

印数:1~4 000册 定价:22.50元

ISBN 7-80159-400-2/TU·188

前　言

随着国家基本建设的快速发展，社会对土建专业人才的数量与质量提出了更高的要求，与之相应所需的有关知识面更为广泛，知识更新的速度也在不断加快。本书是根据我国对土木工程专业课程设置和教学大纲的要求，结合当前我国高校教育改革和建设发展的现状而编写的教材。

本书在1999年出版的第一版基础上进行了全面修订，全书体现了紧密联系工程实际的特点。书中内容主要以国家对土木工程专业材料课程教学大纲的要求为依据，结合当前土建工程对材料的要求，力求反映当前最先进的技术与知识。因此，在本书修订中进行了大量的修改补充，除了引人最新规范和标准外，对有关理论和材料知识也进行了更新与充实。

考虑我国建设形势的需要，书中除主要介绍了土木工程等相关专业所必须的材料知识外，也介绍了目前部分工程中对于工程质量和管理具有重要作用的相关知识。展望未来土木建筑工程的发展，应该考虑到土木建筑工程材料的更新与发展，为此本书还介绍了部分具有发展潜力的材料及有关知识。

参加本书修改编写的有赵方冉、赵庆新（第一章～第七章、第九章～第十三章）、阎西康（第八章）、宋长柏、陈朝霞（第十四章）。全书由赵方冉统稿，许炳权审阅，另外陈德鹏负责编写第十章的部分内容及试验五，并负责全书的插图绘制工作。

有许多读者对第一版的内容提出了宝贵的建议，在此表示衷心的感谢。如有不足之处，敬请读者批评和指正。联系地址：天津市河北工业大学561信箱，邮编：300132。

编　者

2002年12月

目　　录

第一章　导言 …… 1
第二章　土木建筑工程材料的基本性质 …… 5
第一节　材料的物理状态参数 …… 5
第二节　材料的基本物理性质 …… 8
第三节　材料的力学性质 …… 13
第四节　材料的装饰性、化学性和耐久性 …… 17
第三章　天然石材 …… 19
第一节　岩石的形成与分类 …… 19
第二节　工程砌筑石材 …… 20
第三节　常用装饰石材 …… 21
第四章　石灰与石膏 …… 26
第一节　石灰 …… 26
一、石灰的生产工艺概述 …… 26
二、石灰的消化和硬化 …… 27
三、石灰的技术要求和技术标准 …… 27
四、石灰的应用与贮存 …… 29
第二节　建筑石膏 …… 30
一、石膏的分类 …… 30
二、建筑石膏的生产 …… 31
三、建筑石膏的水化与硬化 …… 31
四、建筑石膏的技术性质 …… 31
五、建筑石膏的应用 …… 33
第五章　水泥 …… 34
第一节　硅酸盐系水泥 …… 34
一、硅酸盐系水泥的凝结硬化概念 …… 34
二、硅酸盐系水泥的生产与组成 …… 34
三、硅酸盐系水泥的水化、凝结与硬化机理 …… 36
四、硅酸盐系通用水泥 …… 38
五、硅酸盐系水泥的主要技术性质 …… 40
六、硅酸盐系水泥的腐蚀与防腐蚀 …… 42
七、硅酸盐系水泥的应用与保管 …… 43
八、其它品种的硅酸盐系水泥 …… 44
第二节　铝酸盐系水泥 …… 47

第三节　硫铝酸盐系水泥 …… 48
第六章　水泥混凝土 …… 50
第一节　混凝土的发展概况 …… 50
第二节　普通混凝土的组成材料 …… 51
一、水泥 …… 51
二、细集料 …… 52
三、粗集料 …… 56
四、混凝土用水 …… 58
第三节　新拌混凝土混合料的性质 …… 58
一、混凝土混合料的和易性 …… 58
二、混凝土混合料和易性的检测 …… 59
三、混凝土混合料和易性的选择 …… 60
四、影响混合料和易性的因素 …… 60
第四节　硬化混凝土的性质 …… 62
一、硬化混凝土的力学性质 …… 62
二、硬化混凝土的变形性能 …… 66
三、硬化混凝土的耐久性 …… 69
第五节　混凝土强度的检测评定 …… 72
一、标准差已知的统计方法 …… 72
二、标准差未知的统计方法 …… 73
三、非统计方法 …… 73
四、混凝土强度的合格性判定 …… 74
第六节　混凝土的配合比设计 …… 74
一、混凝土配合比设计的基本要求 …… 74
二、混凝土配合比设计的三个参数 …… 74
三、混凝土配合比的基本原理 …… 75
四、混凝土配合比设计的步骤 …… 75
五、混凝土配合比设计实例 …… 78
第七节　混凝土外加剂 …… 80
一、混凝土外加剂的分类 …… 80
二、常用混凝土外加剂 …… 81
第八节　特种混凝土 …… 83
一、水泥粉煤灰混凝土 …… 83
二、防水混凝土 …… 86
三、轻集料混凝土 …… 87
第九节　建筑砂浆 …… 89
一、砌筑砂浆 …… 90
二、抹面砂浆与防水砂浆 …… 95
第七章　沥青与沥青混合料 …… 96
第一节　石油沥青 …… 96

一、石油沥青概述 …… 96
二、石油沥青的组分与结构 …… 97
三、石油沥青的技术性质 …… 98
四、石油沥青的技术标准与选用 …… 102
五、石油沥青的调配与改性 …… 105
第二节　沥青混合料 …… 107
一、沥青混合料概述 …… 107
二、沥青混合料的组成结构 …… 108
三、沥青混合料的强度形成原理 …… 109
四、沥青混合料的技术性质 …… 112
五、热拌沥青混合料的技术标准 …… 115
六、沥青混合料组成材料的技术性质 …… 116
七、矿质混合料的组成设计方法 …… 119
八、热拌沥青混合料的配合比设计方法 …… 123
第八章　金属材料 …… 131
第一节　土木工程钢材 …… 131
一、钢材的分类及性能 …… 131
二、钢材的冷加工和热处理 …… 135
三、土木工程常用钢材 …… 136
四、焊接材料 …… 146
五、钢材的防锈 …… 147
六、钢材的防火 …… 147
第二节　铝材及铝合金 …… 148
第三节　其它金属材料 …… 151
第九章　建筑木材 …… 152
一、木材的分类与结构 …… 152
二、木材的物理力学性质 …… 153
三、木材的特点与应用 …… 155
第十章　建筑墙体材料 …… 157
第一节　墙体用砖 …… 157
一、烧结空心砖与空心砌块 …… 157
二、烧结多孔砖 …… 161
第二节　新型复合板材 …… 162
第十一章　建筑防水材料 …… 165
第一节　屋面刚性防水材料 …… 165
一、黏土瓦 …… 165
二、彩色水泥瓦 …… 166
三、异形屋面防水板材 …… 166
第二节　高分子防水材料 …… 167
一、高分子防水卷材 …… 167

二、防水涂料…… 168
第十二章　建筑装饰与保温材料…… 170
第一节　建筑装饰材料…… 170
一、涂刷类装饰材料…… 170
二、涂抹类装饰材料…… 171
三、贴面类装饰材料…… 173
第二节　建筑保温材料…… 176
第十三章　新型建筑材料及其发展…… 180
第一节　有机高分子材料…… 180
一、有机高分子材料的特性…… 180
二、建筑塑料…… 181
三、其它有机高分子材料及在土木工程中的应用…… 183
第二节　仿木建筑材料…… 183
一、氯氧镁水泥仿木材料…… 183
二、仿木钙塑材料…… 185
三、稻（麦）草板…… 185
四、水泥刨花板…… 186
第三节　新型建筑材料的发展方向——绿色建材…… 186
第十四章　常用土木工程材料试验 ……
试验一　建筑材料的基本性质试验…… 189
试验二　水泥试验…… 194
试验三　混凝土用集料试验…… 201
试验四　普通混凝土立方体抗压强度试验…… 204
试验五　烧结空心砖与多孔砖试验…… 206
试验六　石灰有效氧化钙和氧化镁含量试验…… 209
试验七　沥青材料试验…… 214
试验八　沥青混合料试验…… 219
试验九　石料单轴抗压强度试验…… 227

主要参考文献…… 229

第一章 导 言

一、土木建筑工程材料的分类

任何建（构）筑物都是用材料按一定的要求构筑而成的，土木建筑工程中使用的各种材料，或构成建（构）筑物的各种材料，都是土木建筑工程材料。几乎世界上的各种材料都可用作土木建筑工程材料，为便于区分和应用，工程中常从不同角度对其分类。

1．按基本成分分类

有机材料：以有机物构成的材料，包括天然有机材料（如木材等）和人工合成有机材料（如塑料等）。

无机材料：以无机物构成的材料，包括金属材料（如钢材等）和非金属材料（如水泥等）。

复合材料：包括有机-无机复合材料（如玻璃钢）和金属-非金属复合材料（如钢纤维混凝土）。材料复合后能够克服单一材料的某些缺点，可以发挥复合材料的综合优点，从而满足当代土木建筑工程对材料各种性能的要求。因此，复合材料是未来建筑材料发展的主要方向。

2．按功能分类

结构材料：承受荷载作用的材料（如构筑物的基础、柱、梁所用的材料）。

功能材料：具有其它功能的材料。如起围护作用的材料，起防水作用的材料，起装饰作用的材料，起保温隔热作用的材料等。

3．按用途分类

建筑结构材料，桥梁结构材料，水工结构材料，路面结构材料，建筑墙体材料，建筑装饰材料，建筑防水材料，建筑保温材料等。

二、材料在土木建筑工程中的作用

1．材料对保证土木建筑工程质量的作用

材料是构成土木建筑工程建（构）筑物的物质基础，当然也是其工程质量基础。在土木建筑工程中，从材料的选择、生产、使用、检验评定，到材料的贮运、保管等，任何环节的失误都可能造成工程的质量缺陷，甚至是重大质量事故。国内外土木建筑工程的重大质量事故，无不与材料的质量不良或使用不当有关。因此，合格的土木建筑工程技术人员，必须准确、熟练地掌握有关材料的知识，能够正确地选择和使用有关材料。土木建筑工程材料是土木建筑工程类专业学生一门重要的专业基础课，要学好后续的专业课，为以后的工作打下良好的专业基础，就必须掌握好本课程中的知识。

2．材料对土木建筑工程造价的影响

在一般土木建筑工程的总造价中，与材料有关的费用占50%以上。在实际工程中，材料的选择、使用与管理是否合理，对土木工程的成本影响很大。学习并准确、熟练地掌握土木建筑工程材料知识，可以优化选择和正确使用材料，充分利用材料的各种功能。在满足工程各项使用要求的条件下节约材料费用，从而显著降低工程的成本。因此，从工程技术经济

的角度来看，学好本课程，对以后的工程技术与管理工作是十分必要的。

3．材料对土木建筑工程技术进步的促进作用

在土木建筑工程建设过程中，工程的设计方法、施工方法都与材料密切相关。从根本上说，材料是基础，是决定土木建筑工程结构设计形式和施工方法的主要因素。因此，材料性能的改进和应用技术的进步，将会直接促进土木建筑工程技术的进步，例如：钢材及水泥的大量应用和性能改进，取代了过去的砖、石、土、木，使得钢筋混凝土结构已占领了土木建筑工程结构材料的主导地位。现代玻璃、陶瓷、塑料、涂料等新型材料的大量应用，才把许多建（构）筑物装扮得绚丽多彩。

三、材料在土木建筑工程中的应用现状及发展要求

1．当代土木建筑工程中材料的应用现状

现代土木建筑工程中，尽管传统的土、石等材料仍在基础工程中广泛应用，砖瓦、木材等传统材料在工程的某些方面应用也很普遍。但是，这些传统的材料在土木建筑工程中的主导地位已逐渐为新型材料所取代。在当代土木建筑工程中，水泥混凝土、钢材、钢筋混凝土，已是不可替代的结构材料。新型合金、有机材料及其它人工合成材料，各种复合材料等在土木工程中也占有愈来愈重要的位置。

2．土木建筑工程的发展对材料的要求

人们对建筑物的要求体现在多个方面。首先，各种建筑物必须坚固，满足人们对安全性的要求，这就应选择性能可靠的结构材料。此外，还要求建筑物必须有良好的使用性能，漂亮的外观，这就要求材料具有良好的装饰性及其它物理性能。为此，对于不同的建筑物必须选择相适应的材料，才能满足各种不同的要求。

从土木建筑工程本身的发展来说，为适应工程结构形式的变化，满足人们对使用功能不断提高的要求，应该发展高性能工程材料。这些高性能材料应该包括轻质高强、多功能，良好的工艺性和良好的耐久性。就材料类别来说，应该发展改性无机材料，特别是高性能的复合材料，最有发展前景。

就全社会的发展来说，将来的土木建筑工程材料应该向再生化、利废化、节能化方向发展。为给人类提供有益健康的生活环境，必须大力提倡发展绿色建材，同时，大宗材料还应不断降低成本。这是因为土木建筑工程对材料的消耗极大，历史发展到今天，使得可利用的自然资源和能源已非常有限，由于以往为生产土木建筑工程材料对自然资源的攫取，已使自然环境遭到了巨大的破坏，节约资源和能源对土木建筑工程行业来说，也是一项重要的历史责任。

四、工程技术标准及其在土木建筑工程中的应用

1．土木建筑工程材料的技术标准分类

标准就是对重复性事物和概念所做出的统一规定。它以科学技术和实践经验的综合成果为基础，经有关方面协商一致，由主管机构批准，以特定形式发布，作为共同遵守的准则和依据。简而言之，标准就是对某项技术或产品实行统一执行的要求。土木建筑工程标准，是指对各类工程的勘察、规划、设计、施工、安装、验收等，需要协调统一的事项所制定的规范。建筑材料标准是工程中检验所使用材料质量的依据，只有掌握了材料标准，才能正确地选择、验收和使用材料。按照适用范围，目前，我国现行常用的标准有三大类：

第一类是国家标准，如“GB 175—1999 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥”。其中“GB”为国家标准的代号；“175”为标准编号；“1999”为标准颁布年代号；“硅酸盐水泥、普通硅

酸盐水泥”为该标准的技术（产品）名称。上述标准为强制性国家标准，任何技术（产品）不得低于此标准规定的技术指标。此外，还有推荐性国家标准，以“GB/T”为标准代号，它表示也可以执行其它标准，为非强制性。

第二类是行业标准，如JC/T 479—92建筑生石灰。其中“JC”为颁布此标准的行业标准。代号“JC”为建材行业的标准代号，其它行业标准代号见表1-1；“T”表示为推荐标准；“479”为此技术标准的二级类目顺序号；“—92”为标准颁发年代号。

几个行业的标准代号　　表1-1

行业名称	建工行业	冶金行业	石化行业	交通行业	建材行业	铁路行业
标准代号	JG	YB	SH	JT	JC	TB

第三类是企业标准，代号为“QB”，其后分别注明企业代号、标准顺序号、制定年代号。国家鼓励地方和企业制定技术指标要求高于国家标准的地方标准或企业标准。

工程中可能采用的其它技术标准还有，国际标准（代号ISO）、美国国家标准（ANS）、美国材料与试验学会标准（ASTM）、英国标准（BS）、德国工业标准（DIN）、日本工业标准（JIS）、法国标准（NF）等。目前我国许多标准都向采用ISO标准过渡。

2．材料技术标准在土木建筑工程中的应用

每种材料必须适应相应的使用环境，满足相应的使用条件。因此，材料的技术性质就应达到相应的要求，这个要求就是材料的技术标准。土木建筑工程材料在使用前，必须根据工程要求通过验证试验，检验其部分或全部技术性质指标，这些指标能否达到技术标准规定的要求，就决定了材料是否合格和能否使用。

要了解材料的某一技术性质，就必须要求使用统一的方法，并在统一的条件下检测其技术参数，这种统一的要求，就是材料的试验标准（或称试验规程）。在检验材料的技术指标时，必须按试验标准要求的条件和方法进行试验，其结果方为有效。

为充分发挥材料的功能，还制定了有关土木建筑工程的施工规范（标准），其中规定了材料的贮运、使用要求。只有按照其标准进行操作和使用，才能确保工程质量。

五、本课程的主要内容及学习任务

1．本教材的主要内容

本教材除介绍了土木建筑材料的一些基本性质以外，还重点介绍了当前土木建筑工程中常用的材料，如水泥、石灰、沥青等胶凝材料；砖、石等砌体材料；钢材等结构材料；水泥混凝土、沥青混凝土、砂浆等现场配制材料。此外，还介绍了玻璃、陶瓷、木材、塑料及其它有机高分子材料、各种新型复合材料等。针对上述常用材料的主要技术性质，本书中还介绍了这些材料的结构和性能特点、技术标准，检测这些技术性能指标的试验及质量评定方法，这些材料的使用要求与应用。

2．本课程的理论课学习任务

本课程在理论学习方面，以掌握常用土木建筑材料的性能为主要宗旨，并掌握常用材料的标准及应用。为达到此目的，必须了解材料的生产，熟悉材料的组成、结构、构造及其与性能的关系。还应掌握材料的用途和使用方法及其与材料的结构、组成、性能之间的关系。

为了打好学习后续课程及以后从事土木建筑工程实践的基础，本课程要求学生掌握常用土木建筑材料的主要品种、规格、选择及应用、贮运和管理等方面的知识。

3. 本课程的实验课学习任务

材料在订货前或使用前，必须经验证试验合格后方可使用；现场配制的材料，必须经标准试验合格，并确定了材料配比及配制操作标准后，方可进行配制和使用。材料在工程使用过程中，也应按规定抽样试验，检验工程实际中使用的材料质量是否稳定，性能是否合格。在工程验收中，工程实体的验收试验也是鉴定工程质量的重要手段之一。由此可见，材料试验检验工作，是一项经常化的、责任性很强的工作。材料试验检验在土木建筑工程施工的各个环节都十分重要。

本课程中实验课的主要任务，就是验证已学有关材料的基本理论，学习试验鉴定、检验和评定材料质量的方法。通过实验课，一方面加深学生对理论知识的理解，培养学生严谨的科学态度和实事求是的工作作风；另一方面，培养学生的实践技能，掌握材料基本性能的试验检验和质量评定方法，为从事土木工程实践工作打下坚实的基础。

第二章　土木建筑工程材料的基本性质

土木建筑材料在工程中所起的作用，从根本上讲就是其性质的表现。选择、应用、分析和评价材料，也都以其性质为依据。使用材料，就必须掌握其性质。本课程所指的材料基本性质，是指材料处于不同的使用条件和使用环境时，通常必须考虑的最基本的、共有的性质。因为土木建筑材料处于建（构）筑物的部位不同、使用环境不同、人们对材料的使用功能要求不同，要求材料所起的作用就不同，所要求的性质也会有所不同；所以，对不同种类的材料，应考虑的基本性质也不尽相同。

本章的课程就是学习在不同的使用环境下，各类土木建筑材料的基本性质，并掌握各性质的涵义，影响这些性质的因素，它们彼此间的关系，以便联系工程中的实际和应用，去加深理解、研究和改进这些性质。

第一节　材料的物理状态参数

一、材料的体积

体积是物体占有的空间尺寸。由于材料的物理状态不同，同一种材料可表现出不同的体积。

1．材料的绝对密实体积：材料内部没有孔隙时的体积，或不包括内部孔隙的材料体积。一般以 V 表示材料的绝对密实体积。由于材料自然状态下并非绝对密实，所以绝对密实体积一般难以直接测定，只有玻璃等材料可近似地直接测定。

2．材料的表观体积：整体材料（包括内部孔隙）的外观体积。一般以 V_0 表示材料的表观体积。外形规则材料的表观体积，可直接以尺度量后计算求得；外形不规则材料的表观体积，必须用排水法或排油法测定。

3．材料的堆积体积：散粒状材料堆积状态下的总体外观体积。根据其堆积状态不同，同一材料表现的体积大小可能不同，松散堆积下的体积较大，密实堆积状态下的体积较小。一般以 V' 表示材料的堆积体积。材料的堆积体积，常以材料填充容器的容积大小来测量。

体积的度量单位通常以立方厘米（cm^3）或立方米（m^3）表示。

二、材料的密度

材料的密度，是指材料所具有的质量（M）与其绝对密实体积（V）之比。这里的质量是指材料所含物质的多少，工程实际中常以重量多少来衡量质量的大小；但从概念上讲，重量是材料所受地球引力的大小，质量与重量的概念有本质的区别。

材料的密度通常以 ρ 表示，其计算公式为：

$$\rho = M/V$$

式中　ρ——材料的密度（g/cm^3）；

M——材料的质量（g）；

V——材料的绝对密实体积（cm^3）。

常用的土木建筑材料中多含有内部孔隙，除钢材、玻璃及沥青等外，绝大多数材料不能直接测定其密度（必要时须将材料磨成细粉后测定）。因为材料的密度仅由其微观结构和组成所决定，与其所处的环境或状态无关，要想知道某材料的密度只需查表即可求得。土木建筑工程常用材料的密度见表 2－1。

土木建筑常用材料的密度、表观密度、堆积密度 **表 2－1**

材料名称	密度（g/cm^3）	表观密度（kg/cm^3）	堆积密度（kg/cm^3）
钢材	7.85	7 800～7 850	——
石灰石（碎石）	2.48～2.76	2 300～2 700	1 400～1 700
砂	2.5～2.6	——	1 500～1 700
水泥	2.8～3.1	——	1 600～1 800
粉煤灰（气干）	1.95～2.40	1 600～1 900	550～800
烧结普通砖	2.6～2.7	2 000～2 800	——
普通水泥混凝土	——	（常取 2 500）	——
红松木	1.55～1.60	400～600	——
普通玻璃	2.45～2.55	2 450～2 550	——
铝合金	2.7～2.9	2 700～2 900	——

三、材料的表观密度

表观密度也称视密度，它是指材料所具有的质量（M）与其表观体积（V_0）之比。表观密度通常以 ρ_0 表示，其度量单位是 kg/m^3，计算公式为：

$$\rho_0 = M/V_0$$

式中 ρ_0——材料的表观密度（kg/m^3）；

M——材料的质量（kg）；

V_0——材料的表观体积（m^3）。

因为大多数材料的表观体积 V_0 中多包含有内部孔隙，其孔隙的多少，孔隙中是否含有水及含水的多少，都可能影响其总质量（有时还影响其表观体积）。所以材料的表观密度除了与其微观结构和组成有关外，还与其内部构成状态及含水状态有关。同一种材料在不同的状态或环境下，表观密度的大小可能不同，但一般都在某一范围内。土木建筑工程常用材料的表观密度见表 2－1。

四、材料的堆积密度

材料的堆积密度，是指材料所具有的质量（M）与其堆积体积（V'）之比。堆积密度通常以 ρ' 表示，其度量单位是 kg/m^3，计算公式为：

$$\rho' = M/V'$$

式中 ρ'——材料的堆积密度（kg/m^3）；

M——材料的质量（kg）；

V'——材料的堆积体积（m^3）。

散粒状堆积材料的堆积体积 V' 中，既包括了材料颗粒内部的孔隙，也包括了颗粒间的空隙，除了颗粒内孔隙的多少及其含水多少外，颗粒间空隙的大小也影响堆积体积的大小。因此，材料的堆积密度与散粒状材料自然堆积时的颗粒间空隙、颗粒内部结构、含水状态、

颗粒间被压实的程度有关。土木工程常用材料的堆积密度见表 2－1。

五、材料的孔隙率及孔特征

已经知道，多数土木工程材料内部含有孔隙，这些孔隙的存在会影响材料的性能。

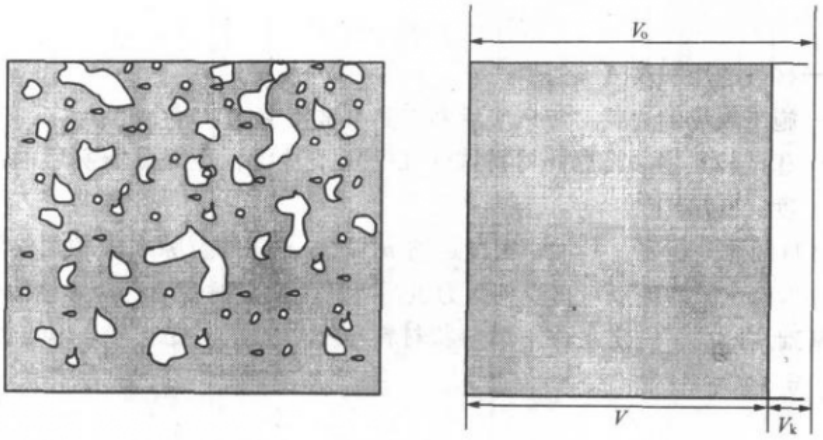


图 2－1　含孔材料体积组成图

材料的孔隙率，是指材料内部孔隙的体积占材料总体积的百分率（见图 2－1 含孔材料体积组成图），它以 P 表示。孔隙率 P 的计算公式为：

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\%$$

孔隙率反映了材料内部孔隙的多少，它会直接影响材料的多种性质。

材料内部除了孔隙的多少以外，孔隙的特征状态也是影响其性质的重要因素之一。材料的孔特征表现为，孔隙是在材料内部被封闭的，还是在材料的表面与外界连通。前者为闭口孔，后者为开口孔。有的孔隙在材料内部是被分割为独立的，还有的孔隙在材料内部相互连通。此外，单个孔隙尺寸的大小，孔隙在材料内部的分布均匀程度等都是孔隙在材料内部的特征表现。这些孔特征对材料的性质有重要影响，在以后的各节内容中会经常涉及到这些孔特征。

与材料孔隙率相对应的另一个概念是材料的密实度。密实度表示材料内被固体所填充的程度，它在量上反映了材料内部固体的含量，对于材料性质的影响正好与孔隙率的影响相反。

六、材料的空隙率

材料空隙率，是指散粒状材料堆积体积（V'）中，颗粒间空隙体积所占的百分率，它以 P' 表示。空隙率 P' 的计算公式为：

$$P' = \frac{V' - V_0}{V'} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_0}\right) \times 100\%$$

空隙率考虑的是材料颗粒间的空隙，这对填充和粘结散粒材料时，研究散粒状材料的空隙结构和计算胶结材料的需要量十分重要。

七、材料的压实度

材料的压实度，是指散粒状材料被压实的程度。已经知道同一材料的堆积密度是可变的，ρ' 的大小与材料被压实的程度有很大关系，当散粒状材料经充分压实后，其堆积密度值为最大，此时的干堆积密度值被定义为 ρ_m，也称为最大干密度。对于未被充分压实的同一

材料来说，其 ρ' 值显然小于 ρ_m。

散粒状材料的压实度，是指经压实后的干堆积密度（ρ'）值与该材料经充分压实后的干堆积密度（ρ'_m）值的比率百分数。压实度通常以 Ky 表示：

$$K_y = \rho'/\rho'_m \times 100\%$$

式中 K_y——材料的压实度（%）；

ρ'——施工现场的材料，经压实后的实测干堆积密度（kg/m^3）；

ρ'_m——在试验室内，将相同材料试样在一定条件下，经充分压实后的最大干堆积密度（kg/m^3）。

散粒状材料经充分压实，其堆积密度达到 ρ'_m 后，相应的空隙率 P' 值已达到最小值，此时的堆积体较为稳定，即使以后再受到压力也不会产生明显的变形，这对结构物的稳定性打下了良好的基础。因此，一定条件下散粒状材料压实后的压实度（K_y）值愈大，其构成的结构物就愈稳定。

第二节　材料的基本物理性质

一、材料的亲水性与憎水性

与水接触时，有些材料能被水润湿，而有些材料则不能被水润湿，对这两种现象来说，前者为亲水性，后者为憎水性。

材料具有亲水性或憎水性的根本原因在于材料的分子结构（是极性分子或非极性分子）。亲水性材料与水分子之间的分子亲合力，大于水分子本身分子间的内聚力。反之，憎水性材料与水分子之间的亲合力，小于水分子本身分子间的内聚力。

工程实际中，材料是亲水性或憎水性，通常以润湿角的大小划分，如图 2－2。其中润湿角 θ 愈小，表明材料愈易被水润湿。当材料的润湿角 $\theta \leqslant 90°$ 时，为亲水性材料；当材料的润湿角 $\theta > 90°$ 时，为憎水性材料。水在亲水性材料表面可以铺展开，且能通过毛细管作用自动将水吸入材料内部。水在憎水性材料表面不仅不能铺展开，而且，水分不能渗入材料的毛细管中，见图 2－3。

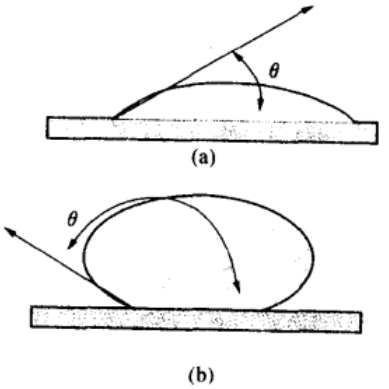


图 2－2　材料润湿示意图

(a) 亲水性材料　(b) 憎水性材料

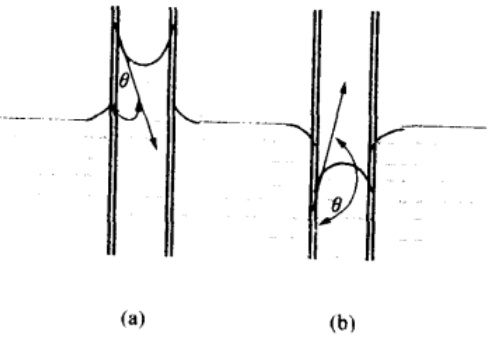


图 2－3　材料毛细管吸水性示意图

(a) 亲水性毛细管　(b) 憎水性毛细管

二、材料的吸水性

亲水性材料在水中吸收水分的能力，称为材料的吸水性，并以吸水率表示该能力。材料吸水率的表达方式有两种：

1．质量吸水率

质量吸水率，是指材料在吸水饱和时，所吸水量占材料干质量的百分比，并以 W_m 表示。质量吸水率 W_m 的计算公式为：

$$W_m = \frac{M_b - M}{M} \times 100\%$$

式中 M_b——材料吸水饱和状态下的质量（g 或 kg）；

M——材料在干燥状态下的质量（g 或 kg）。

2．体积吸水率

体积吸水率，是指材料在吸水饱和时，所吸水的体积占材料自然体积的百分率，并以 W_v 表示。体积吸水率 W_v 的计算公式为：

$$W_v = \frac{M_b - M}{V_0} \times \frac{1}{\rho_w} \times 100\%$$

式中 M_b——材料吸水饱和状态下的质量（g 或 kg）；

M——材料在干燥状态下的质量（g 或 kg）；

V_0——材料在自然状态下的体积（cm^3）；

ρ_w——水的密度（g/cm^3），常温下取 $\rho_w = 1.0\ g/cm^3$。

材料的质量吸水率与体积吸水率之间的关系为：

$$W_m = W_v \times \rho_0$$

其中 ρ_0——材料在干燥状态下的表观密度（g/cm^3）。

材料的吸水率与其孔隙率有关，更与其孔特征有关。因为水分是通过材料的开口孔吸入，并经过连通孔渗入内部的。所以，材料内与外界连通的孔隙愈多，其吸水率可能就愈大。

三、材料的吸湿性

材料的吸湿性，是指材料吸收潮湿空气中水分的性质。当较干燥的材料处在较潮湿的空气中时，便会吸收空气中的水分；而当较潮湿的材料处在较干燥的空气中时，便会向空气中放出水分。前者是材料的吸湿过程，后者是材料的干燥过程（此性质也称为材料的还湿性）。由此可见，在空气中，某一材料的含水多少是随空气的湿度变化的。材料在任一条件下含水的多少称为材料的含水率，并以 W_h 表示，其计算公式为：

$$W_h = \frac{M_s - M_g}{M_g} \times 100\%$$

式中 W_h——材料的含水率（%）；

M_s——材料在吸湿状态下的质量（g 或 kg）；

M_g——材料在干燥状态下的质量（g 或 kg）。

显然，材料的含水率受所处环境中空气湿度的影响，当空气中湿度在较长时间内稳定时，材料的吸湿和干燥过程处于平衡状态，此时材料的含水率则保持不变，其含水率被称为材料的平衡含水率。在某一湿度下，材料的平衡含水率只与其本身的性质有关，一般亲水性

强的材料，含有开口孔隙多的材料，其平衡含水率高，它在空气中的质量变化也大。

材料吸水或吸湿后，除了本身的质量增加外，还会降低其绝热性、强度及耐久性，造成体积的增减和变形，多对工程产生不利的影响。

四、材料的耐水性

材料的耐水性，是指材料长期在水的作用下不破坏，强度也不显著降低的性质。衡量材料耐水性的指标是材料的软化系数，并以 K_R 表示：

$$K_R = \frac{f_b}{f_g}$$

式中 K_R——材料的软化系数；

f_b——材料饱水状态下的抗压强度（MPa）；

f_g——材料干燥状态下的抗压强度（MPa）。

软化系数反映了材料饱水后强度降低的程度，是材料吸水后性质变化的重要特征之一。其实，许多材料吸水（或吸湿）后，即使未达到饱和状态，其强度及其它性质也会有明显的变化。这是因为材料吸水后，水分会分散在材料内微粒的表面，削弱了微粒间的结合力，其强度则有不同程度的降低。当材料内含有可溶性物质时（如石膏、石灰等），吸入的水还可能溶解部分物质，造成强度的严重降低。

材料耐水性这一性质限制了材料的使用环境，软化系数小的材料耐水性差，其使用环境尤其受到限制。工程中通常将 $K_R>0.85$ 的材料称为耐水性材料，可以用于水中或潮湿环境中的重要结构。用于受潮较轻或次要结构时，材料的 K_R 值也不得小于 0.75。

耐水性与材料的亲水性、可溶性、孔隙率、孔特征等均有关，工程中常从这几个方面改善材料的耐水性。

五、材料的抗渗性

材料的抗渗性，是指材料抵抗压力水渗透的性质。土木建筑工程中许多材料常含有孔隙、孔洞或其它缺陷，当材料两侧的水压差较高时，水可能从高压侧通过内部的孔隙、孔洞或其它缺陷渗透到低压侧。这种压力水的渗透，不仅会影响工程的使用，而且渗入的水还会带入能腐蚀材料的介质，或将材料内的某些成分带出，造成材料的破坏。因此，长期处于有压水中时，材料的抗渗性也是决定工程使用寿命的重要因素之一。

表示材料抗渗性的指标有两个：

1. 渗透系数

按照达西定律，在一定的时间 t 内，透过的水量 W，与材料垂直于渗水方向的渗水面积 A 和材料两侧的水压差 H 成正比，与渗透距离（材料的厚度）d 成反比，以公式表示为：

$$W = K_s \frac{A \cdot t \cdot H}{d}$$

式中 K_s——材料的渗透系数（cm/h）；通过试件的试验可求得：

$$K_s = \frac{W \cdot d}{A \cdot t \cdot H}$$

W——时间 t 内的渗水总量（cm^3）；

A——材料垂直于渗水方向的渗水面积（cm^2）；

H——材料两侧的水压差（cm）；

t——渗水时间（h）；

d——材料的厚度（cm）。

材料的 K_s 值愈小，则其抗渗能力愈强。工程中一些材料的防水能力就是以渗透系数表示的。

2．抗渗等级

土木建筑工程中，为直接反映材料适应环境的（防水）能力，对一些常用材料（如混凝土、砂浆等）的抗渗（防水）能力常以抗渗等级表示。

材料的抗渗等级是指材料用标准方法进行透水试验时，规定的试件在透水前所能承受的最大水压力，并以符号“P”及可承受的水压力值（以 0.1 MPa 为单位）表示抗渗等级。如防水混凝土的抗渗等级为 P6、P8、P12、P16、P20，表示其分别能够承受 0.6 MPa、0.8 MPa、1.2 MPa、1.6 MPa、2.0 MPa 的水压而不渗水。因此，材料的抗渗等级愈高，其抗渗性愈强。

材料的抗渗性与其亲水性、孔隙率、孔特征、裂缝等缺陷有关，在其内部孔隙中，开口孔、连通孔是材料渗水的主要通道。工程中一般采用对材料进行憎水处理、减少孔隙率、改善孔特征（减少开口孔和连通孔）、防止产生裂缝及其它缺陷等方法来增强抗渗性。

六、材料的抗冻性

材料的抗冻性，是指材料在饱水状态下，能经受多次冻融循环作用而不破坏，强度也不严重降低的性质。

有些工程常接触水，经常处于饱水状态。在冬天寒冷的季节，温度降为负温时，材料由表及里逐渐结冰，阻止了内部水分的外溢；同时当内部水分结冰时，产生的体积膨胀（约增大 9%）受到材料的约束，造成冰对材料内孔壁的静水压力（即冰晶压力）。此压力可能很大，往往使孔壁胀裂。当温度回升，冰被融化后，某些被冻胀的裂缝中还可能再渗入水分，再次受冻结冰时，材料会受到更大的冻胀和裂缝扩张。如此反复冻融循环，最终导致材料破坏。

工程中通常按规定的方法对材料的试件进行冻融循环试验，例如：对于混凝土常以试件质量损失不超过 5%、强度下降不超过 25%时，所能承受的最多冻融循环次数来确定混凝土的抗冻性，并以抗冻等级表示。材料的抗冻等级，以字符“F”及材料可承受的最多冻融循环次数表示，如 F25、F50、F100 等，分别表示此材料可承受 25 次、50 次、100 次的冻融循环。通常根据工程的使用环境和要求，确定对材料抗冻等级的要求。

就材料本身来说，材料的抗冻性主要与其孔隙率、孔特征、吸水性及抵抗胀裂的强度有关，工程中常从这些方面改善材料的抗冻性。

七、材料的热工性质

材料的热工性包括导热性、热容性和热变形性。

1．材料的导热性

材料的导热性，是指材料两侧有温差时，材料将热量由温度高的一侧向温度低的一侧传递的能力，也就是传导热的能力。

材料的导热性以导热系数 λ 表示，其含义是，当材料两侧的温差为 1 K 时，在单位时间（1 h）内，通过单位面积（1 m^2），并透过单位厚度（1 m）的材料所传导的热量。以公式表示

$$\lambda = \frac{Q \cdot a}{(t_1 - t_2) \cdot A \cdot Z}$$

式中 λ——材料的导热系数（W/（m·K））；

Q——传导的热量（J）；

a——材料的厚度（m）；

A——材料的传热面积（m^2）；

Z——传热时间（h）；

$(t_1 - t_2)$——材料两侧的温度差（K）。

导热系数大的材料，则导热性强，绝热性差。不同土木工程材料的导热性差别很大，通常把$\lambda < 0.23$ W/(m·K）的材料称为绝热性材料。

材料的导热性与其结构和组成、含水率、孔隙率及孔特征等有关，与材料的表观密度有很大的相关性。一般非金属材料的绝热性优于金属材料。材料的表观密度小，孔隙率大，闭口孔多，孔分布均匀、孔尺寸小、含水率小时，则表现出导热性差、绝热性好。通常所说的材料导热系数是指干燥状态下的导热系数。当材料一旦吸水或受潮时，导热系数会显著增大，绝热性明显变差。

2. 材料的热容性

材料的热容性，是指材料受热时吸收热量或冷却时放出热量的能力，它以材料升温或降温时热量的变化来表示，也称热容量。其计算公式为：

$$Q = M \cdot C \cdot (t_1 - t_2)$$

式中 Q——材料的热容量（kJ）；

M——材料的质量（kg）；

$(t_1 - t_2)$——材料受热或冷却前后的温度差（K）；

C——材料的比热[kJ/(kg·K)]。

其中比热（C）值是真正反映不同材料间热容性差别的参数。可以在实验室条件下检测材料在温度变化时的热量释放量，再由下式求出：

$$C = \frac{Q}{M \cdot (t_1 - t_2)}$$

C 值的物理意义是，质量为 1 kg 的材料，在温度每改变 1 K 时所吸收或放出热量的大小。

材料的比热值大小与其组成和结构有关，比热值大的材料对缓冲建（构）筑物的温度变化有利，工程中常优先选择热容量大的材料。因为水的比热值最大，当材料含水率高时，比热值则大。通常所说材料的比热值是指其干燥状态下的比热值。

3. 材料的温度变形性

材料的温度变形性，是指温度升高或降低时材料的体积变化。

除个别材料（如 277 K 以下的水）以外，多数材料在温度升高时体积膨胀，温度下降时体积收缩。这种变化表现在单向尺寸时，为线膨胀或线收缩，相应的技术指标为线膨胀系数（α）。材料的单向线膨胀量或线收缩量计算公式为：

$$\Delta L = (t_1 - t_2) \cdot \alpha \cdot L$$

式中 ΔL——线膨胀或线收缩量（mm 或 cm）；

$(t_1 - t_2)$——材料升（降）温前后的温度差（K）；

α——材料在常温下的平均线膨胀系数（1/K）；

L——材料原来的长度（mm 或 cm）。

土木建筑工程中，对材料的温度变形大多关心其某一单向尺寸的变化。因此，研究其平均线膨胀系数具有实际意义。材料的线膨胀系数与材料的组成和结构有关，常选择合适的材料来满足工程对温度变形的要求。几种常见土木建筑材料的热工参数见表 2－2。

几种常见土木建筑材料的热工参数 **表 2－2**

材料名称	导热系数[W/(m·K)]	比热[J/(g·K]	线膨胀系数($\times 10^{-6}$/K)
钢材	55	0.63	10～20
普通混凝土	1.28～1.51	0.48～1.0	5.8～15
烧结普通砖	0.4～0.7	0.84	5～7
木材（横纹）	0.17	2.51	——
水	0.60	4.187	——
花岗岩	2.91～3.08	0.716～0.787	5.5～8.5
玄武岩	1.71	0.766～0.854	5～75
石灰岩	2.66～3.23	0.749～0.846	3.64～6.0
大理石	3.45	0.875	4.41
沥青混凝土	1.05	——	（负温下）20

第三节　材料的力学性质

材料的力学性质，是指材料在外力作用下的表现或抵抗外力的能力。它主要是材料在外力作用下所表现的强度和变形性。

一、材料的强度与比强度

1．材料的强度

根据材料在工程中的表现，材料的强度，是指材料在外力作用下抵抗破坏的能力。从本质上来说，材料的强度应是其内部质点间结合力的表现。

受外力作用时，在材料内部便产生应力，此应力随外力的增大而增大，当应力增大到材料内部质点间结合力所能承受的极限时，应力再增加便会导致内部质点间的断开，此极限应力值就是材料的极限强度，通常简称为强度。工程实际中建（构）筑物的受力破坏，往往被认为是材料的断裂，此时材料的极限强度就是确定建（构）筑物承载能力的依据。但是，也有些工程的破坏并非是材料的断裂，例如在工程实际中，钢材受力的程度致使内部质点间产生明显的滑移，表现为材料的塑性变形时，就认为建（构）筑物已失去使用性能，此时，尽管材料尚未断裂，也被认为已经破坏，其破坏时的强度并非极限强度，而是屈服强度。

根据所受外力的作用形式不同，材料的强度可分为抗压强度、抗拉强度、抗弯（抗折）强度、抗剪强度等。其受力形式已在材料力学中讲述，此处只将各种受力形式的强度计算公式列于表 2－3。

不同作用力形式的强度计算公式　　表 2-3

作用形式	强度计算公式
抗　压 抗　拉 或抗剪	$f=\frac{P}{A}$ 式中　f——材料的抗压或抗拉强度（MPa）； P——材料能承受的最大荷载（N）； A——材料的受力面积（mm^2）。
抗弯 （抗折）	$f=\frac{3Pl}{2bh^2}$ 式中　f——材料的抗弯（抗折）强度（MPa）； P——最大荷载（N）； l——两支点间距（mm）； b、h——材料截面的宽度和高度（mm）。

材料的强度与其组成及结构有密切的关系。即使材料的组分相同，若构造不同，强度可能差别很大。其主要原因在于其内部质点间的结合键、孔隙率、孔特征及内部缺陷等的差别。材料内质点间的结合键愈强孔隙率愈小，各孔隙的尺寸愈小且分布均匀，内部缺陷愈少时，则材料的强度愈高。对于内部构造非匀质的材料，其不同方向的强度，抵抗不同形式外力作用的强度也不同。例如木材内部为纤维状结构，其顺纹方向的抗拉强度较高，横纹方向的抗拉强度很低。水泥混凝土、砂浆、砖、石材等非匀质材料的抗压强度较高，而抗拉、抗折强度却很低。

工程中为弥补非匀质材料的某些强度不足，常利用多种材料复合的方法来满足工程的需要。土木建筑工程常用结构材料的强度值范围见表 2-4。

土木建筑工程常用结构材料的强度值范围（MPa）　　表 2-4

材　料	抗压强度	抗拉强度	抗弯（折）强度	抗剪强度
钢材	215～1 600	215～1 600	215～1 600	200～355
普通混凝土	7.5～60	1～4	0.7～9	2.5～3.5
烧结普通砖	5～30	—	1.8～4.0	1.8～4.0
花岗岩	100～250	7～25	10～40	13～19
石灰岩	30～250	5～25	2～20	7～14
玄武岩	150～300	10～30	—	20～60
松木（顺纹）	30～50	80～120	60～100	6.3～6.9

2. 材料的比强度

结构材料在土木建筑工程中的主要作用，就是承受结构荷载。对大部分建（构）筑物来说，相当一部分的承载能力用于承受材料本身的自重。因此，欲提高结构材料承受外荷载的能力，一方面应提高材料的强度，另一方面应减轻材料本身的自重，这就要求材料应具备轻质高强的特点。反映材料轻质高强的力学参数是比强度，比强度是指按单位体积质量计算的材料强度，即材料的强度与其表观密度之比（f/ρ_0）。在高层建筑及大跨度结构工程中常采用比强度较高的材料。这类轻质高强的材料，也是未来土木建筑材料发展的主要方向，几种材料的比强度值见表 2-5。

几种结构材料的参考比强度值表　　表 2-5

材料（受力状态）	强度（MPa）	表观密度（kg/m^3）	比强度
玻璃钢（抗弯）	450	2 000	0.225
低碳钢	420	7 850	0.054
铝材	170	2 700	0.063
铝合金	450	2 800	0.160
花岗岩（抗压）	175	2 550	0.069
石灰岩（抗压）	140	2 500	0.056
松木（顺纹抗拉）	10	500	0.200
普通混凝土（抗压）	40	2 400	0.017
烧结普通砖（抗压）	10	1 700	0.006

二、材料的弹性与塑性

材料在外力作用下会产生变形，不同的材料或同一种材料所受外力的大小不同，就会表现出不同的变形。材料的两种最基本力学变形是弹性变形和塑性变形，此外，还有黏性流动变形和徐变变形等。

1．材料的弹性与弹性变形

材料在外力作用下产生变形，外力去除后能恢复为原来形状和大小的性质就是弹性，这种可恢复的变形称为弹性变形。

弹性变形大小与其所受外力的大小成正比，其比例系数对某种理想的弹性材料来说为一常数，这个常数被称为该材料的弹性模量，并以符号“E”表示，其计算公式为：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

其中　σ——材料所受的应力（MPa）；

　　ϵ——在应力 σ 作用下的应变。

弹性模量 E 是反映材料抵抗变形能力的指标，E 值愈大，表明材料的刚度愈强，外力作用下的变形较小。E 值是土木建筑工程结构设计和变形验算所依据的的主要参数之一。几种常用土木建筑工程材料的弹性模量（E）值见表 2-6。

几种常用土木建筑工程材料的弹性模量值 E（$\times 10^4$ MPa）　　表 2-6

材料	低碳钢	普通混凝土	烧结普通砖	木　材	花岗岩	石灰岩	玄武岩
弹性模量	21	1.45～3.60	0.3～0.5	0.6～1.2	200～600	600～1 000	100～800

2．材料的塑性与塑性变形

材料在外力作用下产生非破坏性变形，外力去除后不能完全恢复到原来形状和大小的性质就是塑性，这种不可恢复的变形称为塑性变形。一般认为，材料的塑性变形是因内部质点间受剪应力作用，使某些质点间相对滑移所致。当所受外力很小时，理想的塑性材料应是不变形的。只有当外力的大小致使材料内质点间的剪应力超过某些质点间相对滑移所需要的应力时，才会产生塑性变形。而且只要该外力不去除，塑性变形会继续发展。在土木建筑工程的施工和材料加工过程中，经常利用塑性变形使材料获得所需要的形状。

工程实际中，理想的弹性材料或塑性材料很少见，大多数材料的力学变形既有弹性变形，也有塑性变形。只是不同的材料或同一材料的不同受力阶段，是以弹性变形为主还是以塑性变形为主。它们的主要区别就是变形能否恢复。

三、材料的脆性与韧性

外力作用下，材料未产生明显的变形而发生突然破坏的性质就是脆性，具有这种性质的材料为脆性材料。一般脆性材料的抗静压强度很高，但抗冲击能力、抗振动作用、抗拉及抗折（弯）强度很差，使用范围受到限制。土木建筑工程中常用的脆性材料有天然石材、普通混凝土、砂浆、普通砖、玻璃及陶瓷等。

材料在振动或冲击等荷载作用下，能吸收较多的能量，并产生较大的变形而不突然破坏的性质就是韧性。材料韧性的主要特点是破坏时能吸收较大的能量，其主要表现为在荷载作用下能产生较大的变形。衡量材料韧性的指标是材料的冲击韧性值，即破坏时单位断面所能吸收的能量，并以符号“α_k”表示，其计算公式：

$$\alpha_k = \frac{A_K}{A}$$

式中 α_k——材料的冲击韧性值（J/mm^2）；

A_K——材料破坏时所吸收的能量（J）；

A——材料受力截面积（mm^2）。

土木建筑工程中对用于桥梁、路面、工业厂房的吊车梁等受振的结构部位，应选用韧性较好的材料。常用的韧性材料有低碳钢、低合金钢、铝材、橡胶、木材、竹材、玻璃钢等复合材料。

四、材料的硬度与耐磨性

1．材料的硬度

材料的硬度，是指材料表面抵抗硬物压入或刻划的能力。土木建筑工程中为保持建（构）筑物的使用性能或外观，常要求材料具有一定的硬度，如部分表面材料、预应力钢筋混凝土锚具等。

工程中用于表示材料硬度的指标有多种，对金属、木材等材料以压入法检测其硬度。其方法分别有，洛氏硬度（HRA、B、C，以金刚石圆锥或圆球的压痕深度计算求得）；布氏硬度（HB，以压痕直径计算求得）等。天然矿物材料的硬度常用摩氏硬度表示，它是以两种矿物相互对刻的方法确定矿物的相对硬度，并非材料绝对硬度的等级。其硬度的对比标准分为十级，由软到硬依次分别为：滑石、石膏、方解石、萤石、磷灰石、正长石、石英、黄玉、刚玉、金刚石。混凝土等材料的硬度常用肖氏硬度检测（以重锤下落回弹高度计算求得）。

2．材料的耐磨性

材料的耐磨性，是指材料表面抵抗磨损的能力。土木建筑工程中有些部位经常受到磨损的作用，如路面、地面等。选择这些部位的材料时，其耐磨性应满足工程的使用寿命要求。材料的耐磨性可用磨损率（G）表示，其试验计算公式为：

$$G = \frac{M_1 - M_2}{A}$$

式中 G——材料的磨损率（g/cm^2）；

$M_1 - M_2$——材料磨损前后的质量损失（g）；

A——材料试件受磨面积（cm^2）。

材料的磨损率 G 值越低，表明该材料的耐磨性越好。一般硬度较高的材料，耐磨性也较好。工程实际中也可通过选择硬度合适的材料来满足对耐磨性的要求。

材料的硬度与耐磨性均与其内部结构、组成、孔隙率、孔特征、表面缺陷等有关。

第四节　材料的装饰性、化学性与耐久性

一、材料的装饰性

材料的装饰性，是指材料对所覆盖建筑物外观美化的改善效果。人们除了要求各种建筑物具备安全与适用的条件外，还会追求其外观状态的美观性。随着生活水平的不断提高，人们往往对建筑物一些外露的表面进行适当的装饰，这些表面装饰不仅改善了建筑物本身及环境的外观，而且往往还能对建筑主体具有保护作用，有时还兼有其它功能（如保温、防水、抗冻、抗腐蚀），甚至可明显地改善建筑物的表面强度。

因为不同的工程及使用环境对装饰材料性能的要求差别很大，难以用具体的参数反映其装饰性的优劣，所以当用于装饰时，对于材料的选择与使用一般可参考以下原则。

1．建筑物对材料装饰效果的要求：主要体现在材料的颜色、质感、光泽、外观形状等方面。这些要求往往与建筑物的类型、所处环境、立体或空间尺寸等有关。

2．建筑物寿命对材料耐久性的要求：主要表现在装饰材料本身对环境条件的抵抗能力，其次是对主体结构保护作用的持久性。对于表面装饰材料的耐久性来说，主要体现在其力学性能、物理性能、化学性能等多方面的综合性能。其力学性能如抗变形能力、变形恢复能力、耐磨能力、耐擦洗能力、抗冲击疲劳能力等。物理性能主要包括吸水性、耐水性、抗渗性、抗冻性、耐热性、保温性、隔音性、光学性等。化学性主要包括耐酸碱能力、抗环境腐蚀能力、耐污染能力、抗风（老）化能力、阻燃能力等。

3．建筑综合投资对材料经济性的要求：装饰材料的经济性要求主要体现在两个方面：一是对建筑物外观要求的重要性，它不仅考虑外观效果，而且应考虑材料耐久性与建筑物寿命的一致性，使其在一次性建设投资允许的条件下，尽可能降低综合费用；二是在满足技术要求的条件下，应选择使用成本较低的装饰材料。

此外，还应考虑装饰材料与环境的协调性，与主体材料的相互匹配性，可维修或翻新性等。

对不同类别的装饰材料有不同的技术要求。对于无机类装饰材料常要求具有一定的抗风化能力、抗裂能力和强度性、耐腐蚀性、耐水性、耐磨性、加工性与表面致密程度。对于有机类装饰材料常要求具有良好的化学稳定性（抗老化能力）、阻燃或耐热性、抗污染性、强度或刚度、耐磨性等。

二、材料的化学性质与耐久性

1．材料的化学性质

已经知道，土木建筑工程材料的各种性质几乎都与其化学组成或化学结构有关。材料组成或结构的变化，很可能造成某些性质的改变，从而影响工程的使用性能，甚至导致工程的破坏。

材料化学性质的范畴很广，就其在土木建筑工程中的应用来说，主要关心它在使用中可能发生的化学变化与化学稳定性。

土木建筑工程材料的化学变化，主要是指材料在生产（加工）或使用（施工）过程中所产生的化学反应。通过这些化学变化，可能使材料的内部组成或结构发生显著的变化，并导致其它性质产生不同程度的变化。例如石灰的煅烧、消化与碳化，水泥的水化与凝结等，经过这些正常的化学变化，才能使材料在工程中形成所需要的性质。

在土木建筑工程中，材料的有些化学变化是人们期望不要发生的。因为这些化学变化可能使材料的性质变差，所以，要求材料对这些化学变化有较强的抵抗能力。材料的化学稳定性，是指在工程所处环境条件下，材料的化学组成与结构能够保持稳定的性质。土木建筑工程在使用环境中可能受到（水、阳光、空气、温度等）各种因素的影响，由于这些因素的作用会使材料的某些组成或结构产生变化。有些变化还会降低工程的使用功能，例如：金属的腐蚀，水泥及混凝土的酸类或盐类腐蚀、碱-集料反应，沥青等有机材料的老化等。为保证材料具有良好的化学稳定性，许多材料标准都对其组成与结构进行了限制规定。

2．材料的耐久性

材料的耐久性是指材料抵抗各种自然因素及有害介质的作用，能够长期保持原有性能的能力。

在土木工程的使用环境中，材料可能因为各种条件的影响而产生不利的化学变化。如可能遭受干湿变化、冷热变化、冻融变化或压力水等物理作用。还可能受到磨损、疲劳等机械作用，昆虫、菌类等生物作用。长期在这些环境因素作用下，材料的性能会产生不同程度的变化，并且往往降低其使用功能。当材料抵抗这些作用的能力较强时，使用功能下降的速度就较慢，工程的使用寿命就会延长。因此，材料的耐久性直接决定了工程的使用寿命。土木建筑工程中应根据所处的环境条件选择耐久性适当的材料，满足工程的寿命要求。

对材料耐久性指标的要求，是根据所处工程环境来决定的。例如：处于冻融环境的工程，要求材料具有良好的抗冻性，当有机材料处于暴露环境时，要求材料有较强的抗老化能力。

影响材料耐久性的内在因素主要有：材料的组成与结构、强度、孔隙率、孔特征、表面状态等。工程中改善材料耐久性的主要措施有：根据使用环境选择材料的品种；采取各种方法控制材料的孔隙率与孔特征；改善材料的表面状态，增强抵抗环境作用的能力。

第三章　天然石材

天然石材是土木建筑工程应用历史最久，应用最为广泛的建筑材料之一。建筑用石材是由各种岩石加工而成的。岩石是在地质作用下产生的，由一种或多种矿物按一定规律组成的自然集合体。工程中常用的天然石材是指从天然岩石中采得的毛石，或经加工制成的石块、石板及其它制品。

天然石材具有抗压强度高、耐久性好、生产成本低等优点，是古今中外土木建筑工程中修建城垣、房屋、桥梁、道路及水利工程的优良材料之一。天然石材经加工后具有良好的装饰性，是各种土木建筑工程的主要装饰材料。天然石材经自然风化或人工加工后形成的卵石、碎石和砂等还是生产混凝土、修筑道路及建筑物基础的主要材料。

第一节　岩石的形成与分类

依据岩石的形成条件，天然岩石可分为岩浆岩（也称火成岩）、沉积岩（也称水成岩）、变质岩三大类。

岩浆岩是地壳深处的熔融岩浆上升到地表附近，或喷出地表，经冷凝而成的。前者为深成岩，后者为喷出岩。深成岩构造致密，表观密度大，强度高，耐磨性好，吸水率小，耐水性好，抗冻及抗风化能力强。喷出岩为骤冷结构物质，内部结构结晶不完全，有时含有玻璃体物质。当喷出的岩浆层较厚时，其性质类似深成岩。当喷出的岩浆层较薄时，形成的岩石常呈多孔结构，也具有较高的工程使用价值。

沉积岩是原来露出地面的岩石经自然风化后，再由流水冲积沉淀而成的。沉积岩多为层状结构，与深成岩相比致密度较差，表观密度较小，强度较低，吸水率较大，耐久性较差。

变质岩是由原生岩石或沉积岩经过地壳内部高温、高压及运动等变质作用后形成的。在变质过程中，岩浆岩既保留了原来岩石结构的部分微观特征，又有变质过程中形成的重结晶特征，还有变质过程中造成的碎裂变形等特征。沉积岩经过变质过程后往往变得更为致密，深成岩经过变质过程后往往变得更为疏松。因此，不同变质岩的工程性质差异较大，这与其变质过程及内部结构等有关。各类岩石的分类情况及主要品种见图 3－1。

- 天然石材
 - 岩浆岩（火成岩）
 - 大块状
 - 深成岩：花岗岩、闪长岩、辉长岩等
 - 喷出岩：玄武岩、辉绿岩、流纹岩、粗面岩等。
 - 碎块状
 - 散粒状：火山灰、火山渣、浮石等。
 - 胶结状：火山凝灰岩等。
 - 沉积岩（水成岩）
 - 化学沉积岩：石膏、白云石、菱镁矿等。
 - 有机沉积岩：石灰岩、白垩、硅藻石、贝壳岩等。
 - 机械沉积岩：
 - 散粒状：页岩、砾石、砂、黏土等。
 - 胶结状：砂岩、砾岩等。
 - 变质岩
 - 岩浆岩变质岩：片麻岩等。
 - 沉积岩变质岩：石英岩、大理岩、板岩等。

图 3－1　天然石材的分类及主要品种

第二节　工程砌筑石材

石砌工程以其较高的强度和良好的耐久性而备受土木建筑工程欢迎，石砌结构也曾是土木建筑的主要结构形式。其实，在许多现代土木建筑工程中石砌工程仍起着不可替代的作用。由于石材的性能变化很大，为保证工程质量必须了解对砌筑石材的质量要求。

一、工程对砌筑石材的基本要求

1．土木工程对砌筑石材尺寸规格的要求

常用的砌筑石材有毛石或料石。毛石的形状不规则，仅要求其中间厚度不小于 15 cm．至少有一个方向的长度不小于 30 cm，并且平毛石应有两个大致平行的面。料石的宽度和厚度均不得小于 20 cm，长度不宜大于厚度的 4 倍，形状应大致呈六面体。

2．土木工程对石材抗压强度的影响

依据边长 70 mm 立方体试件的抗压强度，国家标准将砌筑石材的强度等级划分为 MU10、MU15、MU20、MU30、MU40、MU50、MU60、MU80、MU100 共九个等级。当试件为非标准尺寸时，可按表 3－1 进行换算。工程用石材的抗压强度必须满足设计要求的强度等级。

石材试件的尺寸强度换算系数　　表 3－1

立方体边长（cm）	200	150	100	70	50
换算系数	1.43	1.28	1.14	1.00	0.86

3．土木工程对石材耐水性的要求

不同石材的内部组成或结构差别很大，造成各自的耐水性具有较明显的差别。处于水中的重要结构物，必须采用高耐水性的石材，其软化系数应大于 0.9。处于水中的一般结构物，可以使用中耐水性石材，其软化系数为 0.7～0.9。只有不常遇水的结构物可以使用低耐水性石材，其软化系数为 0.6～0.7。软化系数低于 0.6 的石材不宜使用在可能接触水的工程上。

4．土木工程对石材抗冻性的要求

在土木工程中一般以石材抵抗冻融循环的能力表示其抗冻性。当经过规定次数的冻融循环后，石材试件无（穿过试件两棱角的）贯穿裂缝，质量损失不超过 5%，强度降低不大于 25%时，则认为该石材的抗冻性合格。一般对于水中桥墩和水工构筑物的表面石材要求抗冻融次数大于 50 次，其它室外工程表面用石材的抗冻融次数应大于 25 次。

对于某些特殊的工程，还可能要求石材有耐磨性、吸水性或抗冲击性。

决定石材上述技术性质的因素有：石材的矿物组成（主要是其中性质较差的成分含量）、结构特征（如一般情况下结晶联结结构的石材更为致密稳定，胶结联结结构的石材因其胶结物或胶结结构的不同而差异较大）、构造特点（矿物成分在岩石中分布的均匀程度、内部结构的连续性等）、受风化的程度等。

二、常用砌筑石材

1．花岗岩

花岗岩是一种典型的深成岩，其主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 等，并以石英或长石等矿物形式存在。其外观颜色主要取决于所含深色矿物的种类与含量，常为肉红、浅灰、灰白、浅

黄等颜色。

花岗岩的表观密度大（$\rho_0=2\,300\sim2\,800\ kg/m^3$）、内部结构致密（孔隙率约为0.04%～2.80%）、抗压强度高（约100～250 MPa）、吸水率低（约为0.1%～0.7%）、硬度高且耐磨性好、抗风化能力强、耐久性好、耐水性及耐酸性好。但脆性明显，抗冲击和抗火性差。有些花岗岩具有放射性，当放射性超标时不得应用于人常接触的建筑物。

在土木建筑工程中，花岗岩常应用于砌筑基础、墩、柱、常接触水的墙体与护坡等，也是永久性建筑物或纪念性建筑物优先选择的材料。此外，花岗岩还是优良的建筑装饰材料。

2．石灰岩及白云岩

石灰岩属沉积岩，其主要成分是$CaCO_3$，常呈灰色，其矿物成分以方解石为主。当黏土含量达到25%～50%时称为泥灰岩；当白云石含量达到25%～50%时称为白云质石灰岩。

一般砌筑工程所用的石灰岩结构比较致密，表观密度较大（$\rho_0=2\,300\sim2\,700\ kg/m^3$），有较高的抗压强度（约20～120 MPa），吸水率差别较大（约为0.1%～4.5%）。通常这些石灰石容易加工，常用于砌筑基础、墩、柱或墙体。也有松散状或多孔状的石灰石（如白垩等），各种石灰石可以用于生产石灰或水泥。

白云石的主要成分为$CaMg(CO_3)_2$（其含量在50%以上），通常外观与石灰石相近，其强度与稳定性高于石灰石。它是一种较好的砌筑石材，用途与石灰石相近，但不能用于生产水泥。

3．砂岩

砂岩也属于沉积岩，其主要成分是石英（SiO_2），宏观结构为0.05～2 mm的砂粒胶结而成，由于其胶结成分的不同，其颜色也不相同，常呈浅灰、浅红或浅黄色。

砂岩的性能与其胶结物的种类、胶结密实程度有关，一般由氧化硅胶结的（称为硅质砂岩）为浅灰色，它质地坚硬耐久；由碳酸钙胶结的（称为钙质砂岩）为灰白色，具有一定的强度，但耐酸性较差，只可应用于一般的砌筑工程。砂岩表观密度差别较大（通常为$2\,200\sim2\,700\ kg/m^3$），性能差别也较大，一般强度为5～200 MPa，孔隙率为1.6%～28.3%，吸水率为0.2%～7.0%，软化系数为0.44～0.97。

第三节　常用装饰石材

装饰石材主要是指用于工程各表面部位的装饰性板材或块材，也包括各种园林小品、标志、造型、室内摆设等所采用的石材。由于石材性能的差别，应用于土木建筑工程的装饰石材主要是花岗岩和大理石

一、天然花岗岩

天然花岗岩既是优良的砌筑石材，也是优秀的装饰石材。由于天然花岗岩资源十分有限，目前多是将其加工成板材或块材应用于装饰工程中。

花岗岩是典型的深成岩，是全晶质岩石，其主要成分是石英、长石与少量的暗色矿物和云母。按照花岗岩结晶颗粒的大小，分为细粒、中粒和斑状结晶结构。由于花岗岩中含有不同的带色成分，可使其呈灰色、黄色、蔷薇色、红花色等。优质的花岗岩中石英含量较多（可达20%～40%），云母含量较少，晶粒细而匀，结构紧密，不含其它杂质。因此，抛光后光泽明亮，不易风化，色调鲜明，花色丰富，庄重大方。

与其它石材相比，天然花岗岩的表观密度较大，抗压强度高，孔隙率很小，吸水率很低，材质硬度大（通常肖氏硬度为 80～100）。因此，它具有极优良的耐磨、耐腐蚀、抗冻性等，是建造永久性建筑物的高耐久性材料，通常耐用年限可达 75～200 年以上。它经磨平或抛光后，在工程中常应用于各种地面、墙面、踏步、墩柱、勒脚及护坡等环境恶劣的部位。

1．天然花岗岩板材的加工

天然花岗岩板材是将开采出的大块石料经整形、锯切、磨平和抛光等工序加工而成。其中原来不规则的大块石料经凿、切后得到的六面体石块称为荒料。其中荒料的尺寸大小应满足设备加工能力和产品规格的需要，适应起重运输的能力。一般要求荒料的尺寸不得有负偏差，长、宽、高的正偏差也不宜超过 60 mm。不同颜色或花纹的板材所具备的价值差别很大，板材加工的程度和质量也是衡量其价值的主要标志之一。天然石材的基本加工工艺如图 3－2。

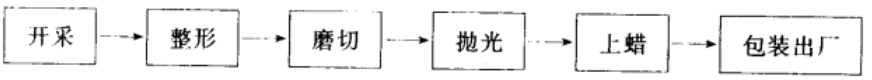


图 3－2　天然石材的加工工艺

2．花岗岩板材的分类

根据装饰用花岗岩板材的基本形状可划分为普通型平面板材（N 型）和异型板材（S 形或弧形）两类。依据其表面加工程度又可划分为：

（1）粗面板材（RU）：表面粗糙但平整，有较规则的加工条纹，给人以坚固、自然、粗犷的感觉，适用于要求坚固耐久的土木建筑工程。

（2）细面板材（RB）：经表面磨光后的板材，给人以庄重华贵的感觉，并且，能在较长时间内保持原貌。

（3）镜面板材（PL）：它是在细面板材的基础上经过抛光形成晶莹的光泽，给人以华丽精致的感觉。

细面板材和镜面板材主要应用于大型建筑物的局部装饰、室内墙柱面、室内外地面的装修。

此外，根据不同的加工工艺，花岗岩板材还可分为剁斧板、粗磨板、磨光板、机刨板等。

3．花岗岩板材的规格尺寸与质量要求

考虑花岗岩板材的加工、运输、施工以及对建筑物结构荷载的影响，其产品的尺寸规格受到一定的限制。当板材越薄时可能对建筑物结构荷载的影响就越小。因为花岗岩石材硬而脆，加工难度较大，特别是加工很薄的板材时成品率下降。虽然采用先进加工手段可加工出厚度 5 mm，甚至更薄的板材，但目前大量生产的仍然以厚度 20 mm 的为主。常用花岗岩板材规格尺寸见表 3－2。

常用花岗岩板材规格尺寸　　表 3－2

长（mm）	宽（mm）	长（mm）	宽（mm）
300	300	600	600
305	305	640	610
400	400	900	600
600	300	919	610
600	305	1 070	762

为保证装饰效果，对应用于同一工程的花岗岩板材的外观色调与花纹要求，应基本协调一致，规格尺寸与建筑整体相协调，相同尺寸规格板材间的尺寸偏差不得明显。由于在材质、加工水平等方面的差异，花岗岩板材的外观质量可能产生较大差别，这种差别容易造成装饰效果、施工操作等方面的缺陷。因此，国家标准对花岗岩板材的尺寸及外观质量均要求达到相应的标准。其标准要求见表 3－3、表 3－4。

普通花岗岩板材尺寸允许偏差（mm） **表 3－3**

项目			细磨和镜面板材			粗磨板材		
			优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
尺寸允许偏差	长度 宽度		0 －1.0	0 －1.5		0 －1.0	0 －2.0	0 －3.0
	厚度	＜15	±0.5	－1.0	+1.0 －2.0	—		
		＞15	+1.0	±2.0	+2.0 －3.0	+1.0 －2.0	+2.0 －3.0	+2.0 －4.0
平整度允许极限公差	平板长度	≤400	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
		400～1 000	0.50	0.70	0.90	1.50	2.00	2.20
		≥1 000	0.80	1.00	1.20	2.50	2.50	2.80
角度允许极限公差	平板宽度	≤400	0.40	0.60	0.80	0.60	0.80	1.00
		＞400			1.00		1.00	1.20

花岗岩板材正面外观缺陷要求 **表 3－4**

名称	缺陷含义	优等品	一等品	合格品
缺棱	沿周边长度每米内，长度为 5～10 mm 的掉棱不应多于（个）	不允许	1	2
缺角	每块板面上面积在 2 mm^2～5×2 mm^2 范围内的损角不应多于（个）			
裂纹	每块板面上长度大于 20 mm，且不超过两端顺延至板边总长度 1/10 的裂纹不得多于（条）			
色斑	每块板上面积在 15 mm^2～20×30 mm^2 范围内的色斑不应多于（个）			
色线	每块板面上长度大于 40 mm，且不超过两端顺延至板边总长度 1/10 的色线不得多于（条）		2	3
坑窝	粗面板材的正面出现的凹坑	不明显	不影响使用	

注：要求拼缝板材正面与侧面的夹角不得大于 90°。

二、天然大理石

天然大理石，是由方解石或白云石在高温、高压等地质条件下，重新结晶变质而成的变质岩，其主要成分为碳酸钙及碳酸镁。“大理石”是由于我国的此类石材，最初大量产于云南大理而得此名。通常质地纯正的大理石为白色，俗名为汉白玉，是大理石中的优良品种。当在变质过程中混有色杂质时，就会出现各种色彩或斑纹，从而产生了众多的大理石品种，如艾叶青、雪花、碧玉、黄花玉、彩云、海涛、残雪、虎纹、桃红、秋枫、红花玉、墨壁等。

天然大理石结构致密，表观密度较大（2 600～2 700 kg/m^3），抗压强度较高（100～

150 MPa)。但硬度并不太大（肖氏硬度 50 左右），使其既具有较好的耐磨性，又易于抛光或雕琢加工，取得光洁细腻的表面效果。大理石的吸水率也很小（<1%），具有较好的抗冻性和耐久性，其使用年限可达 40～100 年以上。对于抛光或磨光的装饰薄板材来说，即使其吸水率不大，在有些情况下也会带来影响。工程中通常由于板材的吸水率较大或含有较多的可溶物质，会产生“潮华”现象，主要表现为粘贴后板材表面的局部泅湿阴影或返碱，造成装饰效果不良的现象，特别是当基层渗水或渗潮时容易出现这种情况。

大理石板材的规格尺寸与质量要求

根据所加工板材的基本形状，大理石板材可分为直角四边形的普通型板材（N 形）、S 形或弧形等异形板材。《天然大理石建筑板材（JC 79—92）》建材标准依据板材加工的尺寸精度及正面外观缺陷，将其划分为优等品（A 级）、一等品（B 级）与合格品（C 级）三个质量等级，并要求同一批板材的花纹色调应基本一致。不同等级板材的要求见表 3－5、表 3－6。

普通大理石板材的规格尺寸及允许偏差（mm）　　**表 3－5**

规格			允许偏差		
			优等品	一等品	合格品
规格尺寸允许偏差	长、宽		0 －1.0	0 －1.0	0 －1.5
	厚度	<15	±0.5	±0.8	±1.0
		>15	+0.5 －1.5	+1.0 －2.0	±2.0
平面允许极限公差	≤400		0.20	0.30	0.50
	400～800		0.50	0.60	0.80
	800～1 000		0.70	0.80	1.00
	≥1000		0.80	1.00	1.20
角度允许极限公差	≤400		0.30	0.40	0.60
	>400		0.50	0.60	0.80

大理石板材正面外观缺陷要求　　**表 3－6**

缺陷名称	优等品	一等品	合格品
翘曲	不允许	不明显	有，但不影响使用
裂纹			
砂眼			
凹陷			
色斑			
污点			
正面棱缺陷　长≤8，宽≤3			有 1 处
正面角缺陷　长≤3，宽≤3			有 1 处

大理石的抗风化能力较差。由于大理石的主要组成成分 $CaCO_3$ 为碱性物质，容易被酸性物质所腐蚀，特别是大理石中有色物质很容易在大气中溶出或风化，失去表面的原有装饰

效果。因此，多数大理石不宜用于室外装饰。

三、天然装饰石材的选材与应用

天然石材具有良好的装饰性能和技术性能，特别是耐久性方面是其它装饰材料难以比拟的，在永久性建筑物及高档建筑物装修中经常采用天然石材装饰。天然装饰石材也具有成本高、自重大、部分使用性能较差等方面的缺陷，在选择装饰石材时应注意以下几点：

1. 综合成本。考虑一次性投资与长期维护费用、当地材料价格、施工成本等方面对装饰工程的影响。

2. 石材物理力学性能与耐久性。石材的强度（特别是抗冲击性能）、热物理性能、耐磨性能与耐风化性能等耐久性指标，是否满足使用要求，是否与建筑物的设计要求及环境相适应。

3. 装饰性。与其它材料相比，选择石材的装饰效果是否最佳，这种装饰效果是否与环境条件相协调，所选石材的品种、色彩、表面质感或光泽是否能达到理想的效果。

由于大理石板材良好的装饰性能，它常应用于高级公用建筑、纪念性建筑的内部装修，如内墙面、柱面、台阶与地面的表面铺贴。此外，大理石还是良好的雕塑材料。除了个别品种（汉白玉、艾叶青等）外，多数大理石因含有易风化成分而不适于室外装饰。

因为花岗岩具有优良的耐久性，所以可应用于许多恶劣的环境中。通常剁斧板材应用于各种建筑物的室外地面、台阶、基座装饰；机刨板材多应用于室内外地面、台阶、基座、踏步、檐口、护坡等处的表面装饰。粗磨板材多应用于室内外的墙面、柱面、台阶、纪念碑与铭牌。磨光板材主要应用于要求色彩与光泽的室内外墙面、地面、柱面以及各种标志的装饰。

工程中使用装饰石材时，应注意其强度、吸水率、自重、厚度等方面对施工质量的影响。由于天然石材吸水率很低，在墙面装饰中难以直接靠黏结定位，常采用湿挂或干挂法铺贴。因此，要求石材必须达到一定厚度才能方便打孔。只有石材较薄且黏结剂性能较好时才能采用直接黏结法。

第四章　石灰和石膏

在土木建筑中起黏结作用，并且用来将散粒状材料（如砂、石）或块状材料（如砖、砌块）黏结成为整体的材料，统称为胶凝材料。胶凝材料分为两大类：有机胶凝材料和无机胶凝材料。无机胶凝材料按其能否在水中凝结硬化、产生和保持强度，又分为水硬性胶凝材料（如水泥）和非水硬性胶凝材料。其中非水硬性胶凝材料只能在空气中硬化，通常又称为气硬性胶凝材料。本章所讲述的石灰和石膏是土木工程中最常用的气硬性胶凝材料。

第一节　石　　灰

石灰是以碳酸盐类岩石（石灰石、白云石、白垩、贝壳等）为原料，经过900～1 300 ℃的高温煅烧，分解出二氧化碳后，所得到的一种产品。其主要成分为氧化钙（CaO）和氧化镁（MgO）。

根据成品加工方法的不同，可分为：

1. 块状生石灰：由原料煅烧而成的原产品，主要成分为CaO；

2. 生石灰粉：块状生石灰经磨细而成的粉状产品，其主要成分亦为CaO；

3. 消石灰粉：将生石灰用适量的水消化而成的粉末，亦称熟石灰粉，其主要成分为$Ca(OH)_2$；

4. 石灰膏（浆）：将生石灰加多量的水（约为石灰体积的3～4倍）消化而成。石灰浆在储存坑中沉淀，并除去上层水分后，称为石灰膏。石灰膏多用于配制石灰砂浆，如果水分加得更多，则呈白色悬浮液，称为石灰浆（或石灰乳），主要用于粉刷等。

在基础工程中，石灰广泛用于基础改性增强处理，可使黏土及酸性工业废料产生一定的强度和水稳定性，获得造价低、性能优良的效果。在结构建筑中，石灰是一种廉价易得的胶结材料和涂料，主要用于墙体砌筑、墙面抹灰、内墙和天棚刷白，增加室内美观和亮度。在许多硅酸盐建筑材料的生产中，石灰也是必不可少的原料。

一、石灰的生产工艺概述

用于煅烧石灰的原料，主要以富含氧化钙的岩石为主，也可利用含有氧化钙和部分氧化镁的岩石。其化学反应可表示如下：

$$CaCO_3 \xrightarrow[178\ kJ/mol]{900\ ℃} CaO + CO_2 \uparrow$$

生石灰多为白色或浅灰色的块状物，烧透的块状石灰堆积密度约为800～1 000 kg/m^3。在煅烧过程中，往往由于石灰石原料的尺寸过大或窑中温度不均匀等原因，使得石灰中含有未烧透的内核，这种石灰称为“欠火石灰”。欠火石灰是不能消化的残渣，使得石灰有效氧化钙和氧化镁含量降低，使用时缺乏黏结力，降低石灰的使用效率，还由于这些残渣颗粒的存在影响砌筑、抹面等施工操作。另一种情况是由于烧制的温度过高或时间过长，使得石灰表面出现裂缝或玻璃状的外壳，体积收缩明显，颜色呈灰褐色，块体密度大，消化缓慢，这

种石灰称为“过火石灰”。若将过火石灰使用于土木建筑工程中，当石灰已经硬化后，其中过火颗粒才开始熟化，并产生体积膨胀，引起隆起鼓包和开裂。为防止欠火石灰和过火石灰对工程的影响，在使用前必须将其消除。

二、石灰的消化和硬化

1．石灰的消化

工地上使用石灰时，通常将石灰加水，使之消解为膏状或粉末状的消石灰，这个过程称为石灰的消化，又称熟化。其反应过程为：

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 64.9\ kJ/mol$$

石灰的消化为放热反应，消化时体积增大1～2.5倍，煅烧良好，氧化钙含量高的石灰消化较快，放热量和体积增大也较多。石灰的消化，理论上需水为氧化钙的32.1%。由于一部分水分被蒸发，通常实际加水量为石灰质量的60%～80%，才能使制成的消石灰粉保证充分消解而又不过湿成团。石灰消化时，为消除“过火石灰”的危害，可使其有足够的消化时间，此过程称为“陈伏”，通常要求“陈伏”时间应不低于半个月，以使“过火石灰”在高湿度环境下被充分消化。对于石灰浆，为防止消化形成的$Ca(OH)_2$被空气中的CO_2中和形成无胶凝性的$CaCO_3$，陈伏期间应在其表面覆盖一层（2 cm以上）水分，使之与空气隔绝。

经过预先消化，可使石灰在消化过程中的体积膨胀和放热提前释放，并消除“欠火石灰”与“过火石灰”的危害。在一般工程中，它是必不可少的过程。

2．石灰的硬化

石灰的硬化，是指石灰由塑性状态转变为具有一定结构强度的过程。它主要是通过石灰的干燥硬化和碳酸化两种方式完成。

（1）石灰的干燥硬化

消化的石灰浆体在干燥过程中由于水分的蒸发，使得各颗粒间形成网状孔隙结构，这时，滞留在孔隙中的自由水，由于表面张力的作用而产生毛细管压力，使石灰颗粒间更加紧密，从而获得附加强度。

由于水分的蒸发，引起$Ca(OH)_2$溶液过于饱和而结晶析出，并产生颗粒间的结晶联结桥，使其形成了一定结晶强度。其反应式为：

$$Ca(OH)_2 + nH_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \cdot nH_2O$$

干燥硬化是石灰早期强度的主要来源。

（2）石灰的碳化硬化

消化石灰中的$Ca(OH)_2$与渗入的CO_2，产生反应形成$CaCO_3$的过程，被称为石灰的碳化。石灰浆体经碳化后可获得更高的强度，并称为碳化强度。石灰碳化作用，只有在水和空气同时存在的条件下才能进行。其化学反应式为：

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + nH_2O \longrightarrow CaCO_3 + (n+1)H_2O$$

因为石灰的充分碳化需要很长的时间，所以它对于石灰的后期强度起主要作用。若需要获得较高的早期碳化强度，可以通过强化手段加速碳化过程，尽早获得碳化强度。

三、石灰的技术要求和技术标准

1．技术要求

用于土木建筑工程的石灰，主要要求下列技术指标：

（1）氧化钙和氧化镁（$CaO+MgO$）含量

石灰中能够产生胶结性的有效成分是氧化钙和氧化镁，它们的含量是评价石灰质量的有效指标。

石灰中氧化钙分为“结合氧化钙”和“游离氧化钙”两类。结合氧化钙是在煅烧中生成的钙盐（如硅酸钙、铝酸钙和铁酸钙等），在石灰中几乎不起胶凝作用。游离氧化钙是石灰中的胶结成分，它又分为“活性”和“非活性”两种。活性氧化钙是其中的主要胶结成分。非活性氧化钙是由“过烧”造成的，其中有些通过粉碎，可变成活性氧化钙。

（2）生石灰产浆量和未消化残渣含量

石灰产浆量是单位质量（1 kg）的生石灰经消化后，所产石灰浆的体积（L）。石灰产浆量愈高，则表示其质量愈好。未消化残渣含量是生石灰消化后，未能消化而存留在 5 mm 圆孔筛上的残渣占试样的百分率。

（3）二氧化碳（CO_2）含量

生石灰或生石灰粉中 CO_2 含量指标，是反映石灰石在煅烧时因“欠火”造成产品中尚未完全分解碳酸盐的多少。CO_2 含量越高，即表示未分解碳酸盐的含量越高，则 CaO + MgO 含量相对降低，相应的石灰胶结性能较差。

（4）消石灰粉游离水含量

消石灰中游离水含量，是指化学结合水以外的含水量。它是生石灰消化时，多加的水残留于氢氧化钙颗粒间的，这些水分在使用前容易蒸发，留下的孔隙会加剧消石灰粉的碳化现象，影响其使用效果。

（5）细度

细度是石灰粉的重要质量指标，现行标准以 0.9 mm 和 0.125 mm 筛余百分率控制。0.125 mm 筛余量，包括消化过程中未消化的“过烧”石灰颗粒，含有大量钙盐的石灰颗粒，“欠火”石灰石颗粒或未烧尽的残渣等。筛余物过多时石灰的胶结性较差。

检测石灰粉细度的试验方法，是将 50 g 试样倒入 0.900 mm、0.125 mm 套筛内进行筛余，分别称量筛余物，按原试样计算其筛余百分率。

2、技术标准

建筑石灰的各项技术指标，必须满足现行建材行业标准《建筑生石灰》（JC/T 479—92）、《建筑生石灰粉》（JC/T 480—92）和《建筑消石灰粉》（JC/T 481—92）的规定要求。依据氧化镁含量的多少，可将石灰划分为钙质石灰和镁质石灰两类。而消石灰粉除上述两类外，还有白云石消石灰粉（高镁石灰）。其分类界限如表 4－1。

依照氧化钙和氧化镁含量各项技术指标，建筑石灰可分为优等品、一等品和合格品三个等级，具体要求见表 4－2、表 4－3 和表 4－4。

石灰分类界限 表 4－1

种类 / 氧化镁含量(%) / 类别	生石灰	生石灰粉	消石灰粉
钙质石灰	≤5	≤5	<4
镁质石灰	>5	>5	4≤MgO<24
白云石消石灰粉	—	—	24≤MgO<30

生石灰技术指标（JC/T 479－92） **表 4－2**

项　目	钙质生石灰			镁质生石灰		
	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
1. CaO＋MgO 含量（%）不小于	90	85	80	85	80	75
2. 未消化残渣（5 mm 圆孔筛筛余量）（%）不大于	5	10	15	5	10	15
3. CO_2（%）不大于	5	7	9	6	8	10
4. 产浆量（L/kg）不小于	2.8	2.3	2.0	2.8	2.3	2.0

生石灰粉技术指标（JC/T 480－92） **表 4－3**

项　目		钙质生石灰			镁质生石灰		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
1. CaO＋MgO 含量（%）不小于		85	80	75	80	75	70
2. CO_2（%）不大于		7	9	11	8	10	12
3. 细度	0.9 mm 筛筛余（%）不大于	0.2	0.5	1.5	0.2	0.5	1.5
	0.125 mm 筛筛余（%）不大于	7.0	12.0	18.0	7.0	12.0	18.0

消石灰粉技术指标（JC/T 481－92） **表 4－4**

项　目		钙质消石灰			镁质消石灰			白云石消石灰		
		优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品	优等品	一等品	合格品
1. CaO＋MgO 含量（%）不小于		70	65	60	65	60	55	65	60	55
2. 游离水（%）		0.4～2.0			0.4～2.0			0.4～2.0		
3. 体积安定性		合格	合格	—	合格	合格	—	合格	合格	—
3. 细度	0.9 mm 筛筛余（%）不大于	0	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0.5
	0.125 mm 筛筛余（%）不大于	3	10	15	3	10	15	3	10	15

四、石灰的应用及贮运

尽管石灰在消化过程中表现出体积膨胀和大量放热的特点，但在消化后的熟石灰应用中往往表现出截然相反的特点，在干燥环境中使用时，这些特点表现得尤为突出。

1．在干燥环境中使用时石灰的特点和应用

石灰在干燥环境中使用时，通常只表现为气硬性，它在硬化过程中，常伴有体积收缩和开裂，这不仅影响其外观，还会严重影响其强度和耐久性，因此，在应用中常采取一些措施

防止其开裂。

（1）石灰用于干燥环境中砌体的砌筑和抹面时，往往加入细集料或纤维材料，其作用就是减少石灰硬化过程中的体积收缩，阻止开裂，改善碳化性能。此时，石灰常用于石灰砂浆或石灰水泥砂浆、麻刀或纸浆石灰膏。

（2）石灰制品在硬化过程中，可采取措施加强碳化，通过碳化来弥补收缩造成的缺陷，如石灰碳化制品，石灰乳等。

2．石灰与含活性硅铝质的材料混合使用时的特点和应用

石灰在潮湿环境中可与活性硅铝质材料混合使用，经过化学反应表现为水硬性。由于在通常条件下其化学反应速度很慢，往往采用高温高压养护、碾压活化或长期潮湿，使其充分反应，强度得以充分发展。

（1）石灰与黏土或硅铝质工业废料混合使用，制成石灰土或石灰—工业废料的混合料。加入适量的水充分拌合后，经碾压或夯实，在潮湿环境中使石灰与活性氧化硅或氧化铝反应，生成具有水硬性的水化硅酸钙或水化铝酸钙，适合在潮湿环境中使用。如建筑物或道路基础处理中使用的石灰土、三合土、二灰土（石灰、粉煤灰或炉灰）、二灰碎石（石灰、粉煤灰或炉灰、级配碎石）等。

（2）石灰与废砂或硅铝质工业废料混合均匀，经压振或压制，形成硅酸盐制品。为使其获得早期强度，往往进行蒸养或蒸压，使石灰与硅铝质材料反应速度显著加快，使制品产生较高的早期强度。如灰砂砖、硅酸盐砖、硅酸盐混凝土制品等。

3．石灰的贮运

石灰贮运中应特别注意防止受潮和碳化，防止失去胶结能力。也不得与易燃易爆物品混放。一般粉状石灰的有效储存期为一个月，否则胶凝性会明显降低。过期石灰应重新检验其有效成分含量。对于石灰膏可将陈伏期转化为储存期，只要有水的覆盖和封闭作用，石灰膏的胶凝性不会降低。

第二节　建筑石膏

石膏是以硫酸钙为主要成分的矿物，当石膏中含有的结晶水不同时，可形成多种性能不同的石膏。建筑石膏仅是这些石膏中的一种，它是工程中常用的一种气硬性胶凝材料。

一、石膏的分类

根据石膏中含有结晶水的多少不同可分为：

1．无水石膏（$CaSO_4$）：也称硬石膏，它结晶紧密，质地较硬。自然界中少量的天然石膏为无水石膏。它是生产硬石膏水泥和硅酸盐水泥的原料。

2．生石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）：也称二水石膏，大部分天然石膏矿为生石膏。它是生产建筑石膏的主要原料。

3．建筑石膏（$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$）：也称熟石膏或半水石膏。它是由生石膏加工而成。根据其内部结构不同可分为α型半水石膏和β型半水石膏，它们是土木建筑工程中常用的胶凝材料。

除上述石膏外，工业废石膏也是石膏的主要来源之一。如磷化工厂的废渣为磷石膏，氟化工厂的废渣为氟石膏。它们都以硫酸钙为主要成分，并含有少量其它杂质，其中含有各种

状态的石膏，是混合型的石膏。此外，工业废石膏还有盐石膏、陶瓷生产废石膏等。

二、建筑石膏的生产

建筑石膏通常是由天然石膏经压蒸或煅烧加热而成。常压下煅烧加热到 107 ℃～170 ℃，可产生 β 型建筑石膏：

$$\underset{\text{（二水石膏）}}{CaSO_4\cdot 2H_2O} \xrightarrow[107\,℃\sim 170\,℃\text{常压加热}]{} \underset{\text{（β 型半水石膏）}}{CaSO_4\cdot\frac{1}{2}H_2O+1\frac{1}{2}H_2O}$$

120 ℃条件下压蒸加热可产生 α 型建筑石膏：

$$\underset{\text{（二水石膏）}}{CaSO_4\cdot 2H_2O} \xrightarrow[120\,℃\text{下压蒸加热}]{} \underset{\text{（α 型半水石膏）}}{CaSO_4\cdot\frac{1}{2}-H_2O+1\frac{1}{2}H_2O}$$

α 型半水石膏晶体与 β 型半水石膏相比，结晶颗粒较粗，比表面积较小，强度高，因此，也称为高强石膏。

当加热温度超过 170 ℃时，可生成无水石膏，只要温度不超过 200 ℃，此无水石膏就具有良好的凝结硬化性能。

温度在 200 ℃～800 ℃之间时，生成的无水石膏凝结性能很差，必须与其它物质配合使用，才能表现出凝结性能。

温度高于 800 ℃时，部分石膏会分解出 CaO，经磨细后被称为煅烧石膏。由于其中 CaO 的激发作用，其凝结硬化性能得以改善，经水化后能获得较高的强度、耐磨性和耐水性，这种石膏也称为地板石膏。

三、建筑石膏的水化与硬化

建筑石膏与适量水拌和后，能形成可塑性良好的浆体，随着石膏与水的反应，浆体的可塑性很快消失而发生凝结，此后，强度进一步产生加强至硬化。此过程实际上是建筑石膏与水之间一系列化学反应的结果，其反应式为：

$$CaSO_4\cdot\frac{1}{2}H_2O+1\frac{1}{2}H_2O=\!=\!=CaSO_4\cdot 2H_2O$$

此反应实际上也是一种半水石膏的溶解和二水石膏沉淀的可逆反应，因为半水石膏的溶解度高于二水石膏，所以可逆反应总体表现为向右进行，即表现为沉淀反应。

就其物理过程来看，随着二水石膏沉淀的不断增加，就会产生结晶。结晶体的不断生成和长大，晶体颗粒之间便产生了摩擦力和黏结力，造成浆体的塑性开始下降，这一现象称为石膏的初凝。而后，随着晶体颗粒间摩擦力和黏结力的增大，浆体的塑性很快下降，直至消失，这种现象为石膏的终凝。整个过程称为石膏的凝结。

石膏终凝后，其晶体颗粒仍在不断长大和连生，形成相互交错且孔隙率逐渐减小的结构，其强度也会不断增大，直至水分完全蒸发，形成硬化后的石膏结构，这一过程称为石膏的硬化。

石膏浆体的凝结和硬化并非是完全分别进行的，实际上是交叉进行的，因为二者均是石膏水化和结晶的结果，只是根据外观表现人为划分的。这种划分有其工程意义，一般石膏的成型应在其浆体初凝之前进行，表面修整应在终凝前进行，石膏成品必须在硬化后方可运输和使用。

四、建筑石膏的技术性质

1．建筑石膏的技术特性

(1) 建筑石膏的凝结硬化速度快

建筑石膏的浆体，即使在不采取其它措施的情况下，其凝结硬化速度也很快。一般石膏的初凝时间仅为 10 min 左右，终凝时间不超过 30 min，这对于普通工程施工操作十分方便。有时需要操作时间较长，可加入适量的缓凝剂，如动物胶、亚硫酸盐酒精废液等。

(2) 建筑石膏凝结硬化时的体积稳定

建筑石膏凝结硬化是石膏吸收结晶水后的结晶过程，其体积不仅不会收缩，而且还稍有膨胀，这种膨胀不会对石膏造成危害，还能使石膏的表面较为光滑饱满，棱角清晰完整，避免了普通材料干燥时的开裂。

(3) 建筑石膏硬化后孔隙率较大，重量轻，但强度低

建筑石膏在使用时，为获得良好的流动性，加入的水分要比水化所需的水量多，因此，石膏在硬化过程中由于水分的蒸发，使原来的充水部分空间形成孔隙，造成石膏内部的大量微孔，使其重量减轻，抗压强度也因此下降。通常石膏硬化后的表观密度约为800～1 000 kg/m^3，抗压强度约为 3～5 MPa。

(4) 建筑石膏硬化体具有良好的隔热和吸音性能

石膏硬化体中大量的微孔，使其传热性显著下降，因此，具有良好的绝热能力。石膏的大量微孔，特别是表面微孔，使声音传导或反射的能力显著下降，具有较强的吸声能力。建筑石膏硬化体的导热系数一般为0.121～0.205 W/(m.K)。

(5) 防火性能好，但耐水性能差

硬化后石膏的主要成分是二水石膏，当其遇火后会脱出结晶水，并能在表面蒸发形成水蒸气幕，可有效地阻止火的蔓延，具有良好的防火效果。由于硬化石膏的强度来自于内部结晶体粒子间的黏结力，当遇水后，粒子间连接点的黏结力可能被削弱，甚至可能使部分二水石膏溶解而产生局部溃散，所以建筑石膏硬化体的耐水性较差。通常其软化系数为 0.3～0.45，这就限制了建筑石膏的使用条件。

(6) 有良好的装饰性和可加工性

石膏不仅表面光滑饱满，而且质地细腻，颜色洁白，因此，具有良好的装饰性。石膏的微孔结构使其脆性有所改善，硬度也较低，使得硬化石膏可锯、可钉、可刨，易于连接，具有良好的可加工性。

2. 建筑石膏的质量标准

为满足工程对建筑石膏的技术要求，国家标准（GB 9776—88）对其抗折、抗压强度的大小和细度进行了限制，并根据这些指标将建筑石膏划分为优等品、一等品与合格品，具体指标见表 4－5。

建筑石膏技术指标标准 表 4－5

技术指标	优 等 品	一 等 品	合 格 品
抗折强度不得小于（MPa）	2.5	2.1	1.8
抗压强度不得小于（MPa）	4.9	3.9	2.9
细度（0.2 mm 方孔筛筛余%）	≤5.0	≤10.0	≤15.0
凝结时间	初凝时间不早于 6 min；终凝时间不迟于 30 min		

注：表中以 2h 强度为标准；指标中有一项不符合者，应予降级或报废。

建筑石膏的产品质量等级可以用代号来表示，其标记顺序为：产品名称、抗折强度值、标准号，如一等品的建筑石膏可表示为：建筑石膏 2.1 GB 9776。

五、建筑石膏的应用

建筑石膏的许多特点决定了它在工程中的应用，由于重量轻和易加工的特点，常用于制作民用建筑的各种内隔墙板和吊顶板材。由于装饰性好的特点，常用于室内装饰。由于凝结较快和体积稳定的特点，常用于制作建筑雕塑。此外，建筑石膏也可用于生产水泥和各种硅酸盐建筑制品。

因为建筑石膏自身强度较低，又为微酸性材料，不能配加强钢筋，所以不能用作承重结构材料。由于它的耐水性差，不得应用于常接触水的环境。随着技术的不断进步，建筑石膏强度低的缺点可通过掺加玻璃纤维等方法改善，耐水性差的缺点可通过防水性掺加剂或进行表面处理等方法改善。

建筑石膏粉吸潮后会影响其以后使用时的凝结硬化性能和强度，长期储存也会降低强度，因此，建筑石膏粉贮运时必须防潮，储存时间不得过长，一般不得超过三个月。

第五章　水　　泥

水泥是粉状的水硬性胶凝材料。当水泥加水拌和成塑性浆体后，能在空气中或水中凝结硬化，并将其它材料胶结成整体，形成坚硬的石材。

水泥是土木建筑工程中最重要的材料之一，土建技术及管理人员必须掌握有关水泥的知识。

几十年来，随着材料技术的进步和工程对水泥性能要求的变化，使得水泥的品种愈来愈多。目前工程中应用最多和最普遍的是硅酸盐系水泥，其次，还有铝酸盐系和硫铝酸盐系水泥。不同系类的水泥性能差别很大，即使是同一系类的水泥，由于品种或规格不同，其性能也有较大差别，各自的主要用途也不一样。本章主要学习工程中最常用的硅酸盐系水泥、铝酸盐系水泥及硫铝酸盐系水泥的性能和应用。

第一节　硅酸盐系水泥

硅酸盐系水泥是土木建筑工程中应用最多的水泥，有关知识也是本章学习的重点内容。

一、硅酸盐系水泥的凝结硬化概念

硅酸盐系水泥为干粉状物，加适量的水并拌和后，便形成可塑性的水泥浆体。水泥浆体在常温下会逐渐变稠直到开始失去塑性，这一现象称为水泥的初凝。随着塑性的消失，水泥浆开始产生强度，此时称为水泥的终凝。水泥浆由初凝到终凝的过程称为水泥的凝结。水泥浆终凝后，其强度会随着时间的延长不断增长，并形成坚硬的水泥石，这一过程称为水泥的硬化。水泥的凝结硬化过程划分如图 5－1。

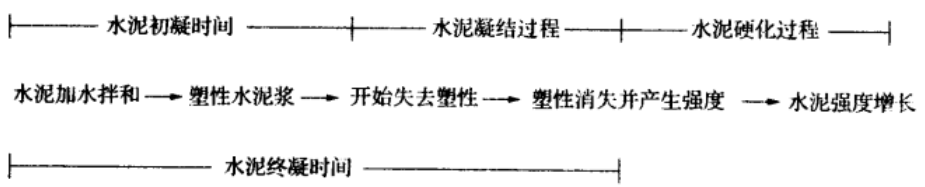


图 5－1　水泥的凝结硬化过程划分

上述水泥的凝结硬化过程只是人为划分的，实际上它们都是对水泥化学反应产物积累过程中宏观表现的描述。工程实际中，从水泥加水拌和起始直到初凝这一段时间，常被称为水泥的初凝时间。从水泥加水起始直到终凝这一段时间，被称为水泥的终凝时间。自水泥加水拌和到水泥硬化后的任一时刻称为水泥的硬化龄期。多数硅酸盐系水泥自终凝的 3～7 d 龄期的这一段时间内强度发展较快，此后的强度增长速度逐渐下降。只要条件适宜，随着时间的延长，水泥的强度值一般处于增长状态。

二、硅酸盐系水泥的生产与组成

根据生产过程的定义，硅酸盐系水泥是以适当成分的生料烧至部分熔融，所得以硅酸钙

为主要成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏及混合材料磨细制成的水硬性胶凝材料。硅酸盐系水泥的基本生产过程如图 5－2。

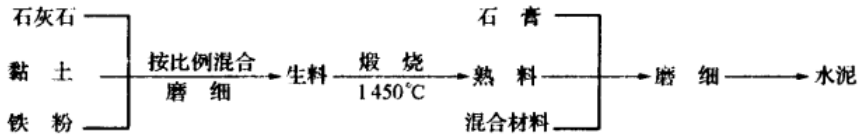


图 5－2 硅酸盐水泥基本生产过程

1．硅酸盐水泥熟料

水泥熟料是由生料煅烧而成的。生料是由含适当比例氧化钙、氧化硅、氧化铝及氧化铁的石灰石、黏土和铁粉按比例混合物组成的。生料经混合磨细，再经煅烧至部分熔融，使其中的各种成分产生一系列物理、化学变化，形成了以下矿物成分：

（1）硅酸三钙

硅酸三钙的化学成分为 $3CaO \cdot SiO_2$，其缩写为 C_3S。它是硅酸盐水泥熟料中最主要的矿物成分，约占水泥熟料总量的 36%～60%。硅酸三钙遇水后能够很快与水产生化学反应（即水化反应），并产生较多的水化热。它对促进水泥的凝结硬化，特别是对水泥 3～7 d 内的早期强度起主要作用。

（2）硅酸二钙

硅酸二钙的化学成分为 $2CaO \cdot SiO_2$，其缩写为 C_2S。它约占水泥熟料总量的 15%～37%。硅酸二钙遇水后反应较慢，水化热也较低。它不影响水泥的凝结，对水泥的后期强度起主要作用。

（3）铝酸三钙

铝酸三钙的化学成分为 $3CaO \cdot Al_2O_3$，其缩写为 C_3A。它约占水泥熟料总量的 7%～15%。铝酸三钙遇水后反应极快，产生的热量大而且很集中。铝酸三钙水化反应对水泥的凝结起主导作用，但其水化产物强度较低，主要对水泥的早期强度有所贡献。

（4）铁铝酸四钙

铁铝酸四钙的化学成分为 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_3O_4$，其缩写为 C_4AF。它约占水泥熟料总量的 10%～18%。铁铝酸四钙遇水时水化反应也很快，水化热较低，水化产物的强度不高，对水泥石的抗压强度贡献不大，但对抗折强度有较大贡献。以上四种主要矿物成分在水化硬化过程中的主要性质见表 5－1。

水泥熟料四种主要矿物的水化、凝结硬化性质　　表 5－1

性　质	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
水化速度	快	慢	最快	很快（仅次于 C_3A）
凝结硬化速度	快	慢	最快	较快
28 天水化热	大	小	最大	中
早期强度	高	低	低	中
后期强度	高	高	低	低

水泥熟料中除上述四种主要矿物成分外，还有少量其它成分，如游离氧化钙（f－CaO）和氧化镁（MgO），硫酸盐及硫化物等，它们对水泥性能都有不利影响。

2．石膏

作为水泥原料的石膏多为生石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$），也可以是其它石膏，其掺量约为3%左右。适量的石膏，在水泥中主要起调节凝结时间的作用。有些特种水泥还需要石膏起其它作用，此时，石膏的掺量会有所增加，对石膏的品种也有特殊要求。

3．混合材料

混合材料是指在水泥生产过程中，为改善水泥性能、调节水泥强度等级，而加到水泥中的矿物质材料。根据在水泥中的表现，混合材料有活性混合材料与非活性混合材料之分。通常，当掺入30%混合材料的水泥与未掺混合材料的同一水泥在相同条件下进行胶砂强度试验时，若二者的28天抗压强度比值大于或等于75%时为活性混合材料，反之为非活性混合材料。

活性混合材料是指能与水泥熟料的水化产物发生化学反应，具有显著潜在水硬性的矿物质材料。这种矿物质能与氢氧化钙等物质反应，并形成水硬性的胶凝材料。这种性能也称为活性混合材料的火山灰性。水泥中掺有活性混合材料时，可能影响早期强度的发展，但后期强度的发展潜力大。常用的活性混合材料有以下几种：

（1）粒化高炉矿渣

粒化高炉矿渣是在高炉炼铁时所得，以硅酸钙和铝酸钙为主要成分的熔融物，经淬冷成粒后的产品。由于矿渣的高温熔融物，经骤冷形成玻璃态结构，使得粒化高炉矿渣具有较强的潜在水硬性。当粒化矿渣中氧化钙含量较高时，还可能具有一定的自身水硬性。

（2）火山灰质混合材料

火山灰质混合材料，是指具有火山灰性的矿物质材料，其主要成分为活性的氧化硅及氧化铝，它能与水中的氢氧化钙反应，生成水硬性的水化硅酸钙及水化铝酸钙，具有明显的潜在水硬性。常用的火山灰质混合材料有火山灰、凝灰岩、硅藻石、沸石、自燃煤矸石、煤炉渣及烧黏土等。

（3）粉煤灰

粉煤灰是从燃煤粉炉中收集的粉末，其主要活性成分也是氧化硅和氧化铝。当粉煤灰中含有氧化钙量在10%以上时，称为高钙粉煤灰。粉煤灰的潜在活性主要取决于含有近球状玻璃体微粒的多少。有些粉煤灰含有较多的未燃尽碳等可燃物质，其活性会受到影响。

其它可利用的活性混合材料还有硅灰、回收窑灰等。

非活性混合材料是指，在水泥中主要起填充作用，与水泥不起或仅起微弱化学作用的矿物质材料。水泥中掺入非活性混合材料的目的，主要是为了调节水泥强度等级、增加水泥产量、降低水化热等改善某些性能的作用。常用的非活性混合材料主要有磨细的石英砂、石灰石、干黏土、慢冷矿渣及炉灰等。

混合材料在水泥中可能发挥的作用，除了与其化学成分和结构有关外，还与其颗粒粗细、形状及级配等有关。水泥中掺加部分经过优化的混合材料后，可显著改善水泥的某些性能。此外，利用工业废料混合材料可以节约天然资源，符合绿色建材的发展方向。因此，国内外十分重视混合材料的研究与应用。

三、硅酸盐系水泥的水化、凝结与硬化机理

1．硅酸盐系水泥的水化

硅酸盐水泥中的各种矿物成分遇水后，会很快发生一系列化学反应，生成各种水化物。

（1）硅酸三钙＋水⟶水化硅酸钙＋氢氧化钙

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

此反应较快，使水溶液中的氢氧化钙迅速饱和，它对混合材料的火山灰性发挥具有促进作用。

（2）硅酸二钙水化反应较慢，反应式为：

硅酸二钙 + 水 ⟶ 水化硅酸钙 + 氢氧化钙

$$2(2CaO\cdot SiO_2)+4H_2O=3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+Ca(OH)_2$$

（3）铝酸三钙和铁铝酸四钙的水化反应分别为：

铝酸三钙 + 水 ⟶ 水化铝酸三钙

$$3CaO\cdot Al_2O_3+6H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O$$

铁铝酸四钙 + 水 ⟶ 水化铝酸三钙 + 水化铁酸一钙

$$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_3O_4+7H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O+CaO\cdot Fe_2O_3\cdot H_2O$$

其中铝酸三钙水化反应极快，很快生成大量的水化铝酸三钙。

（4）水泥中石膏很快与水化铝酸钙反应，生成难溶的水化硫铝酸钙，该产物为针状结晶体，也称为钙矾石晶体。

水化铝酸三钙 + 石膏 + 水 ⟶ 钙矾石

$$3CaO\cdot Al_2O_3H_2O+3CaSO_4H_2O+19H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O$$

经过上述水化反应后，水泥浆中不断增加的水化产物主要有：水化硅酸钙、氢氧化钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙及水化硫铝酸钙等新生矿物。

2．硅酸盐系水泥的凝结

水泥加水拌合后的剧烈水化反应，一方面使水泥浆中起润滑作用的自由水分逐渐减少。另一方面，由于结晶和析出的水化产物逐渐增多，水泥颗粒表面的新生物厚度逐渐增大，使水泥浆中固体颗粒间的间距逐渐减小，越来越多的颗粒相互连接形成了骨架结构。此时，水泥浆便开始慢慢失去可塑性，表现为水泥的初凝。

由于铝酸三钙水化极快，会使水泥很快凝结，使得工程中缺少足够的时间操作使用，为此，水泥中加入了适量的石膏。水泥加入石膏后，一旦铝酸三钙开始水化，石膏会与水化铝酸三钙反应，生成针状的钙矾石。当钙矾石的数量达到一定量时，会形成一层保护膜覆盖在水泥颗粒的表面，阻止水泥颗粒表面水化产物的向外扩散，降低了水泥的水化速度，也就延缓了水泥颗粒间相互靠近的速度，使水泥的初凝时间得以延缓。

当掺入水泥的石膏消耗殆尽时，水泥颗粒表面的钙矾石覆盖层一旦被水泥水化物的积聚所胀破，铝酸三钙等矿物的再次快速水化得以继续进行，水泥颗粒间逐渐相互靠近，直至联接形成骨架。此过程表现为水泥浆的塑性逐渐消失，直到终凝。

3．硅酸盐系水泥的硬化

随着水泥水化的不断进行，凝结后的水泥浆结构内部，孔隙不断被新生水化物填充和加固，使其结构的强度不断增长，即使已经形成坚硬的水泥石，其强度仍在缓慢增长。因此，只要条件适宜，硅酸盐系水泥的硬化在长时期内是一个无休止的过程。

水泥的水化速度表现为早期快后期慢，特别是在最初的 3～7 d 内，水泥的水化速度最快，因此，水泥的早期强度发展最快。

4．影响水泥凝结硬化的主要因素

（1）水泥的熟料矿物组成及细度

水泥熟料中各种矿物的凝结硬化特点不同，当水泥中各矿物的相对含量不同时，水泥的凝结硬化特点就不同。水泥熟料的各种矿物凝结硬化特点见表 5－1。

水泥磨得愈细，水泥颗粒平均粒径愈小，比表面积愈大，水化时与水的接触面大，水化速度愈快，相应地水泥凝结硬化速度愈快，早期强度愈高。

（2）水泥浆的水灰比

水泥浆的水灰比，是指水泥浆中水与水泥的质量之比。当水泥浆中加水较多时，水灰比较大，此时，水泥的初期水化反应得以充分进行。因为水泥颗粒间原来被水隔开的距离较远，颗粒间相互连接形成骨架结构所需的凝结时间长，所以水泥浆凝结较慢。

水泥完全水化所需的水灰比，约为0.15～0.25，而工程实际中往往加入更多的水，以便利用水的润滑取得较好的塑性。当水泥浆的水灰比较大时，多余的水分蒸发后形成的孔隙较多，造成水泥石的强度较低，因此，水泥浆的水灰比过大时，会明显降低水泥石的强度。

（3）石膏的掺量

如上述硅酸盐系水泥的凝结机理所述，硅酸盐水泥中加入适量的石膏会起到良好的缓凝效果。掺入石膏后，由于钙矾石晶体的生成，还能改善水泥石的早期强度。石膏的掺量过多时，不仅不能缓凝，而且，可能对水泥石的后期性能造成危害。因此，石膏的掺加量过多或过少对水泥的凝结都不利。

（4）环境温度和湿度

水泥水化反应的速度与环境的温度有关，只有处于适当温度下，水泥的水化、凝结和硬化才能进行。通常温度较高时，水泥的水化、凝结和硬化速度就较快。当环境温度低于0℃时水泥水化趋于停止，就难以凝结硬化。

水泥水化是水泥与水之间的反应，必须在水泥颗粒表面保持有足够的水分，水泥的水化、凝结硬化才能充分进行。为保证水泥的硬化速度，促使水泥强度不断增长，所采取的保持水泥浆温度和湿度的措施，称为水泥的养护。

（5）龄期

水泥浆随着时间的延长水化物增多，内部结构逐渐密实和牢固，强度不断增长，在早期这种增长更为明显。因此，龄期愈长，水泥浆的强度就愈高。为比较各种水泥间的强度相对高低，常以28 d强度值作为标准龄期强度，简称标准强度。

四、硅酸盐系通用水泥

硅酸盐系水泥的品种很多，不同品种水泥间的差别也较大，可以满足各种工程的不同需要。工程中最常用的硅酸盐水泥，主要有硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥六大品种通用水泥。它们的主要区别就是混合材料的品种和掺量不同。

1．硅酸盐水泥（也称波特兰水泥）

依据GB 175—1999标准，凡以适当成分的生料烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分的水泥熟料，掺入适量石膏、0～5% 的石灰石或粒化高炉矿渣磨细制成的水硬性胶凝材料，就是硅酸盐水泥。当硅酸盐水泥中不掺混合材料时，称为Ⅰ型硅酸盐水泥，代号P.Ⅰ。当硅酸盐水泥中混合材料掺量不超过5%时，称为Ⅱ型硅酸盐水泥，代号P.Ⅱ。

硅酸盐水泥中混合材料很少，其性能完全由熟料所决定。因此，它的水化、凝结及硬化速度均较快，是土木建筑工程中高强结构常用的水泥品种。

2．普通硅酸盐水泥

以硅酸盐水泥熟料为主，加入6%～15%的混合材料和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为普通硅酸盐水泥（简称普通水泥），代号P.O。普通硅酸盐水泥中掺入的非活性

混合材料不得超过水泥总量的10%，其中允许掺加不超过水泥总量5%的窑灰。

普通硅酸盐水泥中混合材料掺量较少，其性能和用途与硅酸盐水泥相近，是我国土木建筑工程中用量最大的水泥品种之一。

3. 矿渣硅酸盐水泥

依据GB 1344—1999标准，凡是由硅酸盐水泥熟料和20%～70%的粒化高炉矿渣及适量石膏混合磨细而成的水硬性胶凝材料，称为矿渣硅酸盐水泥（简称矿渣水泥），代号P.S。矿渣水泥中可由不超过8%的其它混合材料代替粒化高炉矿渣，替代后水泥中粒化矿渣不得少于20%。

4. 火山灰质硅酸盐水泥

由硅酸盐水泥熟料和20%～50%的火山灰质混合材料及适量石膏混合磨细而成的水硬性胶凝材料，称为火山灰质硅酸盐水泥（简称火山灰水泥），代号P.P。

5. 粉煤灰硅酸盐水泥

由硅酸盐水泥熟料和20%～40%的粉煤灰及适量石膏混合磨细而成的水硬性胶凝材料称为粉煤灰硅酸盐水泥（简称粉煤灰水泥），代号P.F。

矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥三者具有许多共性。它们中混合材料掺量都较高，性能方面有以下相似之处：

（1）它们都有明显的二次水化（火山灰反应）的特点。即水泥的混合材料能与水泥熟料水化后，形成的氢氧化钙及掺入的石膏发生二次反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫铝酸钙等新的产物。

（2）它们的早期水化速度较慢，水化热低，凝结时间要比硅酸盐水泥长，早期强度较低，后期强度发展潜力大，可通过加热、加湿、掺外加剂等手段促进其早期强度的发展。

（3）在它们凝结硬化过程中，大量的氢氧化钙和水化铝酸钙被混合材料所结合，形成了较稳定的矿物。因此，它们凝结后的氢氧化钙和水化铝酸钙含量低，相应地碱度较低。

由于这三种水泥掺入的混合材料不同，相互间性能也有所差别。其中火山灰水泥保持水分的性能较好，矿渣水泥保持水分的性能较差；矿渣水泥石结构的耐热性较好，火山灰水泥的耐热性较差；矿渣水泥和火山灰水泥硬化过程中干缩性较大，易产生开裂，粉煤灰水泥硬化过程中的干缩性小，抗裂性较好。

6. 复合硅酸盐水泥

依据GB 12958—1999，凡是由硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上规定的混合材料和适量的石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为复合硅酸盐水泥（简称复合水泥），代号P.C。其中混合材料总掺量应为15%～50%，允许掺加不超过8%的窑灰作为混合材料，掺加矿渣时混合材料掺量不得与矿渣水泥重复。由于复合水泥中对混合材料的品种未加限制，可以掺加多种混合材料，有利于扩大水泥混合材料的范围，其性能和应用介于普通水泥和矿渣水泥。通用硅酸盐系水泥性能特点和适用范围见表5-2。

常用硅酸盐系水泥性能特点和适用范围 表5-2

水泥名称	主要特征	适用范围
硅酸盐水泥 P.Ⅰ和P.Ⅱ型	1. 早期强度高；2. 水化热高；3. 抗冻性好；4. 耐热性差；5. 耐腐蚀性差；6. 干缩性好。	地上、地下及水中的混凝土结构；钢筋混凝土及预应力混凝土结构；遭受冻融循环的结构和要求早强的混凝土结构。

续表

水泥名称	主 要 特 征	适 用 范 围
普通硅酸盐水泥 P.O	1. 早期强度高；2. 水化热较高；3. 抗冻性较好；4. 耐热性较差；5. 耐腐蚀性较差；6. 干缩性较小。	可用于各种混凝土及钢筋混凝土结构。
矿渣硅酸盐水泥 P.S	1. 早期强度低，后期强度高；2. 水化热较低；3. 耐热性较好；4. 耐腐蚀性好；5. 抗冻性较差；6. 干缩性较大；7. 抗渗性差；8. 抗碳化能力差。	大体积工程；高温车间和要求耐热的混凝土结构；地下和水中的混凝土及钢筋混凝土；有耐腐蚀性要求的结构；蒸气养护的结构和构件。
火山灰质硅酸盐水泥 P.P	1. 早期强度低；后期增长较快；2. 水化热较低；3. 耐热性较差；4. 耐腐蚀性好；5. 抗冻性较差；6. 干缩性大；7. 抗渗性较好；8. 抗碳化能力差。	地下、水中及大体积混凝土工程；有抗渗要求的工程；蒸气养护的混凝土构件；耐腐蚀要求高的工程；养护较好的一般混凝土及钢筋混凝土。
粉煤灰硅酸盐水泥 P.F	1. 早期强度低；后期增长较快；2. 水化热较低；3. 耐热性较差；4. 耐腐蚀性好；5. 抗冻性较差；6. 干缩性小，抗裂性好；7. 抗碳化能力较差。	各种大体积混凝土；蒸气养护的混凝土；抗裂性要求较高的结构；耐腐蚀性要求较高的工程；养护较好的一般混凝土及钢筋混凝土。
复合硅酸盐水泥 P.C	1. 早期强度低，后期强度高；2. 水化热较低；3. 耐腐蚀性好；4. 抗冻性较差；	地下、水中及大体积混凝土工程；养护较好的一般混凝土及钢筋混凝土。

五、硅酸盐系水泥的主要技术性质

为保证水泥的使用性能，国家标准对硅酸盐系水泥的某些技术性质指标制定了强制性的标准。其中对 P.Ⅰ型硅酸盐水泥的不溶物含量要求不大于 0.75%；对 P.Ⅱ型硅酸盐水泥的不溶物含量要求不大于 1.5%。其它八项技术指标对各种水泥都做了相应的规定，各自的要求见表 5－3。其中几个主要指标有：

1．水泥的体积安定性

水泥的体积安定性，是表征水泥硬化过程中，体积变化均匀性的物理性能指标。安定性是关系水泥是否合格的决定性指标。水泥在凝结硬化过程中，一般都会发生体积变化，如果这种体积变化是均匀的，一般不会对工程结构造成危害。当水泥中含有游离 CaO、MgO 及过量的三氧化硫时，这些物质会在水泥硬化一段时间后，开始发生体积膨胀性反应，产生不均匀的局部体积膨胀，造成内部破坏应力，导致工程结构的强度降低和开裂，甚至局部崩溃。为防止水泥的体积安定性不良，国家标准规定，对通用硅酸盐系水泥中的 MgO 及硫酸盐含量有严格的要求。一般要求 MgO 含量不得超过 5%，SO_3 含量不得超过 3.5%。水泥在生产中，进入施工现场前或使用前必须检验其安定性。检验水泥安定性的方法有沸煮法和蒸压法两大类，沸煮法中又分为试饼法和雷氏法。具体方法详见水泥实验部分。

2．硅酸盐水泥的强度及强度等级

硅酸盐水泥的强度，是按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》检测的。它是按照标准方法制作的水泥胶砂试件，在标准温度和湿度的环境中，养护到规定龄

期时检测的强度值。其中标准试件尺寸为 4 cm×4 cm×16 cm，胶砂中水泥与标准砂之比为 1：3，标准养护温度为 20±1 ℃，相对湿度大于 90%，规定龄期分别为 3 d 和 28 d，检测的强度分别为抗压强度和抗折强度。

根据规定龄期的抗压和抗折强度值，各种硅酸盐系水泥划分为不同的强度等级。依据国标《GB 175—1999 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》、《GB 1344—1999 矿渣硅酸盐水泥、火山灰硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥》、《GB 12958—1999 复合硅酸盐水泥》等标准的要求，不同品种和强度等级水泥的不同龄期强度不得小于表 5-3 中规定的强度值。

常用硅酸盐系水泥技术性质标准 **表 5-3**

要求指标	硅酸盐水泥		普通硅酸盐水泥 P.O 复合硅酸盐泥 P.C	矿渣硅酸盐水泥 P.S 火山灰质硅酸盐水泥 P.P 粉煤灰硅酸盐水泥 P.F
	P. Ⅰ	P. Ⅱ		
烧失量	<3%	<3.5%	<5%（复合水泥不要求）	—
细度	比表面积>300 m^2/kg		80 μm 方孔筛的筛余量<10%	
终凝时间	<390 分钟		<10 小时	
初凝时间	>45 分钟			
MgO 含量	<5.0%（如经压蒸安定性合格，可允许放宽到 6%）			
SO_3 含量	<3.5%（矿渣水泥可放宽到<4.0%）			
安定性	合格			
碱含量	按 $Na_2O+0.658\,K_2O$ 计算的碱量不得大于水泥质量的 0.6%			

水泥强度等级		不同品种和标号硅酸盐系水泥要求的各龄期强度值（MPa）					
		抗　压	抗　折	抗　压	抗　折	抗　压	抗　折
32.5	3 d	—	—	11.0	2.5	10.0	2.5
	28 d			32.5	5.5	32.5	5.5
32.5 R	3 d	—	—	16.0	3.5	15.0	3.5
	28 d			32.5	5.5	32.5	5.5
42.5	3 d	17.0	3.5	16.0	3.5	15.0	3.5
	28 d	42.5	6.5	42.5	6.5	42.5	6.5
42.5 R	3 d	22.0	4.0	21.0	4.0	19.0	4.0
	28 d	42.5	6.5	42.5	6.5	42.5	6.5
52.5	3 d	23.0	4.0	22.0	4.0	21.0	4.0
	28 d	52.5	7.0	52.5	7.0	52.5	7.0
52.5 R	3 d	27.0	5.0	26.0	5.0	23.0	4.5
	28 d	52.5	7.0	52.5	7.0	52.5	7.0
62.5	3 d	28.0	5.0	—	—	—	—
	28 d	62.5	8.0				
62.5 R	3 d	32.0	5.5	—	—	—	—
	28 d	62.5	8.0				

为满足某些工程对水泥早期强度的要求，国家标准对某些水泥的早期强度要求较高，在这些水泥的强度等级符号后附以字符“R”，它表示为早强型水泥。一般情况下，相同强度

等级时，早强型水泥的3 d强度要高于非早强型水泥。

3. 水泥的凝结时间

为保证水泥浆在工程施工中有足够的时间处于塑性状态，以便于操作使用，国家标准规定了水泥的最短初凝时间，要求各种水泥的初凝时间，不得短于规定的时间，否则视为废品。

为使已形成工程结构形状的水泥浆尽早取得强度，以便能够承受荷载，国家标准规定水泥的终凝时间不得迟于规定的时间。终凝时间过长时，会影响工程的施工进度。

水泥初、终凝时间的检验方法详见水泥实验部分。

4. 碱含量

水泥中含有较多的强碱物时（如 Na_2O 或 K2O），容易对水泥混凝土结构造成危害。为此，国家标准规定，碱含量按 $Na_2O+0.658\ K_2O$ 计算值表示时，水泥中的总碱含量不得大于0.6%。必要时也可由供需双方商定碱含量限定值。

5. 水泥的细度

水泥的细度，是指水泥颗粒的粗细程度。水泥越细，遇水后水泥颗粒与水的接触面积越大，水化速度快，凝结硬化快，早期强度高。否则，会影响水泥的水化速度和早期强度发展。因此，国家标准规定，以80 μm方孔筛的筛余量不得超过规定的限值，或者水泥的比表面积不得小于规定的限值。

硅酸盐系水泥中凡氧化镁、三氧化硫、初凝时间、安定性中任一项不符合规定时，则视为废品，不得用于任何工程。凡细度或终凝时间不符合规定的，混合材料掺量超标或强度低于商标指示值，或包装及其标志不符合规定的，均视为不合格品，不得在重要工程或工程的重要部位使用。

六、硅酸盐系水泥石的腐蚀与防腐蚀

一般情况下，硬化后的水泥石具有良好的耐久性。但在某些腐蚀性介质的长期作用下，水泥石中的某些矿物会被腐蚀，使水泥石的结构遭到破坏，强度逐渐降低，甚至全部溃裂，这种现象称为水泥石的腐蚀。

1. 水泥石腐蚀的方式

（1）软水侵蚀

蒸馏水、冷凝水、雨水、雪水等都是钙离子浓度很低的软水，它对水泥石中氢氧化钙有较强的溶解能力。水泥石长期接触软水时，会使水泥石中的氢氧化钙不断被溶出，当水泥石中游离的氢氧化钙减少到一定程度时，水泥石中的其它含钙矿物也可能分解和溶出，从而导致水泥石结构的强度降低，甚至破坏。当水泥石处于软水环境时，特别是处于流动的软水环境中时，水泥被软水侵蚀的速度更快。

（2）一般酸的腐蚀

工程结构处于各种酸性介质中时，酸性介质易与水泥石中的氢氧化钙反应。其反应产物可能溶于水中而流失，或发生体积膨胀造成结构物的局部胀裂，从而破坏水泥石的结构，这种破坏作用称为一般酸的腐蚀。其基本化学反应式为：

$$\text{氢氧化钙} + \text{酸} \longrightarrow \text{盐} + \text{水}$$

$$Ca(OH)_2 + 2H^+ \longrightarrow C_n^{2+} + 2H_2O$$

（3）碳酸的腐蚀

地表及地下水中常溶有较多的二氧化碳，形成了具有一定浓度的碳酸溶液。当水泥混凝

土结构处于含碳酸水的环境中时，会逐渐腐蚀水泥，造成水泥石结构的破坏。其腐蚀反应过程为：

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O = CaCO_3 + H_2O$$

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca(HCO_3)_2$$

碳酸水是先与水泥石中的氢氧化钙反应，中和后使水泥石碳化，形成了碳酸钙，再与碳酸反应生成可溶性的碳酸氢钙，并随水流失，从而破坏了水泥石的结构。

（4）硫酸盐的腐蚀

已经知道，石膏在水泥凝结过程中起缓凝作用，还有改善水泥早期强度的作用。但是，当水泥浆硬化后，已形成了脆性的水泥石结构，若环境中含有硫酸盐的水渗入到水泥石结构中，容易与水泥石中的氢氧化钙反应生成石膏，所生成的石膏再与水泥石中的水化铝酸钙反应生成钙矾石，并产生体积膨胀。此时的体积膨胀若只在已形成的水泥结构孔隙中进行不会影响水泥石的结构。当其局部膨胀量超过了水泥石的结构孔隙所容许的尺寸时，必然导致脆性水泥石结构的开裂，甚至崩溃。此时的钙矾石，已成为严重危害水泥石结构的有害成分。由于钙矾石为微观针状晶体，人们常称其为水泥杆菌。

有些地区的地下水或地表水中常含有硫酸钙、硫酸镁、硫酸钠等硫酸盐，当其渗入到水泥石中时，往往造成水泥石结构的破坏。此时，应采取适当措施改善水泥对腐蚀环境的抵抗能力。

此外，有些其它物质也能腐蚀水泥石，如镁盐、强碱、糖类、脂肪等。

2．造成水泥石腐蚀的原因

（1）水泥石中存在较多可被腐蚀的成分，如水化铝酸钙、氢氧化钙及易于分解出氢氧化钙的矿物。

（2）凝结硬化过程中形成的水泥石结构不够密实，特别是水泥石的表面不够致密时，腐蚀介质易于渗入和溶出，为水泥石的腐蚀提供了条件。

（3）工程环境中存在有腐蚀介质，是产生水泥腐蚀的外界条件，特别是环境中腐蚀介质的来源充足时，水泥石遭受腐蚀的程度更为严重。

3．防止水泥石腐蚀的方法

工程中为防止水泥石的腐蚀，通常首先分析可能造成水泥石腐蚀的原因，根据产生腐蚀的方式，采取切实可行的方法，一般方法有：

（1）根据工程所处的环境特点，选择适宜的水泥品种，或适当掺加混合材料，减少可被腐蚀物质的浓度，防止或延缓水泥的腐蚀。如处于软水环境的工程，常选用掺混合材料较多的矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥或复合水泥等。因为这些水泥的水泥石结构中氢氧化钙含量较低，特别是游离的氢氧化钙含量更少，酸性的硅铝质材料较多，对软水侵蚀的抵抗能力较强。

（2）采取措施减少水泥石结构的孔隙率，提高密实度，特别是提高表面的密实度，阻塞腐蚀介质出入的通道。例如：通过降低水灰比，改善施工质量，掺加外加剂等方法，使水泥石结构密实，即可防止水泥石的腐蚀。

（3）在水泥石结构的表面设置保护层，隔绝水泥石与腐蚀介质的联系。如采用涂料、贴面等致密的防耐腐蚀层覆盖水泥石，能够有效地保护水泥石不被腐蚀。

七、硅酸盐系水泥的应用与保管

硅酸盐系水泥具有强度高、耐久性好、使用方便、成本低等优点，是普通混凝土及高强

混凝土中最常用的材料。对于大多数永久性工程，应优先选用硅酸盐系水泥。在一般土木建筑工程中，只要掌握了这些水泥的性质，能够正确地选择和使用硅酸盐系水泥，可满足大部分工程的需要。因此，硅酸盐系水泥在土木建筑工程中得到广泛应用。

水泥在使用前，应根据规定（通常每 200 吨为一编号或一批）进行取样试验，经试验合格后，方可在工程中使用。购买袋装水泥时，应注意检验其包装和标志是否合格。根据国家规定，硅酸盐水泥（P.Ⅰ及 P.Ⅱ型）、普通硅酸盐水泥（P.O）的包装印字颜色应为红色；矿渣硅酸盐水泥（P. S）的包装印字颜色应为绿色；火山灰质硅酸盐水泥（P.P）、粉煤灰硅酸盐水泥（P. F）及复合硅酸盐水泥（P.C）的包装印字颜色应为黑色。散装水泥的卡片或袋装水泥的印刷标志应清楚标明：产品名称、代号、净含量、强度等级、生产许可证编号、生产者名称和地址、出厂编号、执行标准号、包装日期，掺有火山灰质混合材料的普通水泥还应标明“掺火山灰”字样。

硅酸盐系水泥在贮运时应注意防水、防潮，还应注意不要贮存过久。一般水泥的有效贮存期为三个月，超过三个月会使水泥的强度明显降低。过期水泥应在使用前重新检验，按其新测得的强度使用。当水泥受潮结块时，应将结块筛除后重新检测强度。不同品种的水泥不得混放，也不得与其它材料混放，以防混用。

八、其它品种的硅酸盐系水泥

土木建筑工程中较常应用的硅酸盐系水泥，除了上述五大品种外，比较常用的还有道路硅酸盐水泥、水工硅酸盐水泥、砌筑水泥等。

1. 道路硅酸盐水泥

依据国家标准 GB 13693—92 规定，凡由适当成分的生料烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分，并且铁铝酸钙含量较多的硅酸盐水泥熟料，称为道路硅酸盐水泥熟料。

将道路硅酸盐水泥熟料掺入 0～10% 活性混合材料和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为道路硅酸盐水泥，简称道路水泥。

国家标准规定，道路水泥中铁铝酸四钙含量不得小于 16.0%，铝酸三钙含量不得大于 5.0%，其它技术指标要求应满足表 5－4 的要求。

道路硅酸盐水泥技术指标要求 表 5－4

要求项目	MgO (%)	SO_3 (%)	烧失量 (%)	细度 80 μm (%)	安定性	28 d 干缩率 (%)	磨损量 kg/m²	凝结时间 (h)	
								初凝	终凝
指标	<5.0	<3.5	≤3.0	≤10	合格	≤0.10	≤3.60	≥1	≤10
强度	抗压强度 (MPa)					抗折强度 (MPa)			
龄期	3 d		28 d			3 d		28 d	
425	22.0		42.5			4.0		7.0	
525	27.0		52.5			5.0		7.5	
625	32.0		62.5			5.5		8.5	

与其它品种的硅酸盐系水泥相比，道路硅酸盐水泥具有抗折强度与早期强度高、耐磨性好、干缩率低，抗冲击性、抗冻性和抗硫酸盐侵蚀能力比较好。它特别适用于公路路面、机场跑道、车站及公共广场等工程的面层混凝土中应用。

2. 水工硅酸盐水泥

水工硅酸盐水泥是指水中建筑工程常用的特种硅酸盐水泥，例如：大坝、港口、矿山及

地下建筑的大体积混凝土工程中，通常要求水泥的水化热低、抵抗硫酸盐及软水等腐蚀的能力强。

目前我国生产的水工硅酸盐水泥主要有中热、低热矿渣，低热微膨胀和抗硫酸盐水泥等品种。

（1）中热硅酸盐水泥

由适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏，磨细制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料，称为中热硅酸盐水泥，简称中热水泥。

（2）低热矿渣硅酸盐水泥

由适当成分的硅酸盐水泥熟料，加入矿渣和适量石膏，磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料，称为低热矿渣硅酸盐水泥，简称低热矿渣水泥。其中矿渣的掺量按质量计为20%～60%，允许采用不超过混合材料总量50%的磷渣或粉煤灰代替部分矿渣。

中热水泥和低热矿渣水泥成本低、性能稳定，是目前要求水化热低的大体积混凝土工程中首选的水泥品种。

（3）低热微膨胀硅酸盐水泥

以粒化高炉矿渣为主要组分，加入适量硅酸盐水泥熟料和石膏，磨细制成的具有低水化热和微膨胀性能的水硬性胶凝材料，称为低热微膨胀硅酸盐水泥，简称低热微膨胀水泥。

低热微膨胀水泥中石膏掺量较高，水化过程中产生的钙矾石较多，使水泥石在早期产生适当的膨胀，增加了水泥石结构的密实度，相应地改善了水泥石的抗渗性。因此，低热微膨胀水泥不仅水化热低，适于大体积水泥混凝土工程，而且水泥石的内部结构致密，抗渗性能好，耐腐蚀性能进一步改善。可见，对大体积水中构筑物，特别是抗渗性要求较高时，使用低热微膨胀水泥应是最佳的选择之一。

（4）抗硫酸盐硅酸盐水泥

在以硅酸钙为主要矿物成分的水泥熟料中，加入适量石膏磨细制成的，具有一定抗硫酸盐侵蚀性能的水硬性胶凝材料，称为抗硫酸盐硅酸盐水泥，简称抗硫酸盐水泥。

在抗硫酸盐水泥中，主要限制了水泥熟料中 C_3A 和 C_4AF 的含量，也限制了 C_3S 的含量，使水泥的水化热较低，抗硫酸盐能力较强，特别适于海工构筑物及其它有耐硫酸盐腐蚀性要求的水中大体积混凝土结构。

中热水泥、低热矿渣水泥、低热微膨胀水泥和抗硫酸盐水泥的技术指标见表5－5和表5－6。

水工硅酸盐水泥的成分和物理化学指标要求 表5－5

水泥品种	中热水泥	低热矿渣水泥	低热微膨胀水泥	抗硫酸盐水泥
熟料中 C_3S	含量≤55%	—	—	含量<50%
熟料中 C_3A	含量≤6%	含量≤8%	—	含量<5%
熟料中 MgO	含量≤5%	含量≤5%	含量≤5%	含量≤5%
游离 f－CaO	含量≤1.0%	含量≤1.2%	含量≤3.0%	含量≤1.0%
熟料中 Na_2O	含量≤0.6%	含量≤1.0%	—	—
熟料烧失量	—	—	—	≤1.5%
水泥 S_3O	含量≤3.5%	含量≤3.5%	含量=4%～6%	含量≤2.5%

续表

水泥品种	中热水泥	低热矿渣水泥	低热微膨胀水泥	抗硫酸盐水泥
水泥细度	80 μm 筛余≤12%	80 μm 筛余≤12%	比面积≤350 m^2/kg	80 μm 筛余≤10%
初凝时间	≥60 min	≥60 min	≥45 min	≥45 min
终凝时间	≤12 h	≤12 h	≤12 h	≤12 h
水泥安定性	合格	合格	合格	合格
水泥线膨胀				
1 d	—	—	≥0.05%	—
7 d	—	—	≥0.10%	—
28 d	—	—	≤0.50%	—

注：①熟料中 Na_2O 含量表示的是以 $Na_2O+0.658\ K_2O$ 计算的总值。

②除上述要求外，还要求抗硫酸盐水泥的 $C_3A+C_4AF<22\%$。

水工硅酸盐水泥强度指标 表 5-6

水工硅酸盐水泥品种	水泥标号	抗压强度（MPa）			抗折强度（MPa）		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
中热水泥	425	15.7	24.5	42.5	3.3	4.5	6.3
	525	20.6	31.4	52.5	4.1	5.3	7.1
低热矿渣水泥	325	—	13.7	32.5	—	3.2	5.4
	425	—	18.6	42.5	—	4.1	6.3
低热微膨胀水泥	325	—	18.0	32.5	—	4.5	7.0
	425	—	27.0	42.5	—	6.9	8.5
抗硫酸盐水泥	325	12.0	19.0	32.5	2.5	3.7	4.5
	425	16.0	25.0	42.5	3.4	4.6	6.4

3. 砌筑水泥

砌筑水泥是以活性混合材料为主，加入适量硅酸盐水泥熟料和石膏，经磨细制成的水硬性胶凝材料。

根据砌筑水泥中活性混合材料的种类不同，可分为不同品种的砌筑水泥。以矿渣为主要组分时，称为矿渣砌筑水泥，其矿渣掺量一般高达 70% 以上。以火山灰质混合材料为主要组分时，称为火山灰质砌筑水泥，其中火山灰质混合材料的掺量不小于 50%。以粉煤灰为主要组分的粉煤灰砌筑水泥中，粉煤灰含量不少于 40%。砌筑水泥的技术指标应符合表 5-7的要求。

砌筑水泥是低强度水泥，硬化慢，但和易性好，特别是具有较好的保水性。其主要用途是用于配制砌筑砂浆或抹面砂浆，也可用于配基础混凝土垫层或蒸养混凝土砌块等。

砌筑水泥的技术指标要求 表 5-7

项　目	细　度	凝结时间	SO_3 含量	熟料 MgO 含量
	0.08 mm 筛余≤10%	初凝≥45 分，终凝≤12 小时	≤4.0%	≤6.0%
标　号	7 d 抗压	28 d 抗压	7 d 抗折	28 d 抗折

续表

项　目	细　度	凝结时间	SO_3 含量	熟料 MgO 含量
125	5.6	12.5	1.2	2.5
175	6.8	17.5	1.6	3.5
225	10.0	22.5	2.0	4.5

第二节　铝酸盐系水泥

铝酸盐系水泥中最常用的是高铝水泥，它是以铝酸钙为主要成分，氧化铝含量约为50%的熟料，磨细制成的水硬性胶凝材料。与硅酸盐系水泥相比，高铝水泥有如下特点。

一、高铝水泥的矿物组成与凝结硬化特点

高铝水泥的主要成分为铝酸一钙（CA）、二铝酸一钙（CA_2）和其它硅铝酸盐等。国家标准规定高铝水泥中氧化硅含量不得大于10%，氧化铁含量不得大于3%。

高铝水泥在使用时，其中的铝酸一钙水化反应很快，可生成大量的水化铝酸钙和氢氧化铝凝胶，并释放出大量的水化热。水化进行到一定程度，水化铝酸钙晶体便会相互交织在一起，迅速形成较坚硬的晶体骨架。此后，氢氧化铝凝胶会填充于这些晶体骨架的孔隙之中，使之形成结构密实、强度较高的水泥石结构。因此，高铝水泥在早期就能形成较坚硬的骨架，具有较高的早期强度。

虽然高铝水泥的早期强度较高，但是某些早期形成的水化铝酸钙产物为亚稳态晶体，经过一段时间或遇高温时会发生晶型转化，并释放出游离水，形成较多的孔隙，造成水泥石强度明显降低。这种强度降低是有限度的，一般经过一段时间的逐渐降低后，最终强度约为早期最高强度的40%～60%。

二、高铝水泥的技术性质

国家标准对高铝水泥细度要求为0.08 mm方孔筛的筛余量不得超过10%。要求初凝时间不得早于40 min，终凝时间不得迟于10 h。根据高铝水泥的1 d、3 d抗压与抗折强度值，分别划分为425、525、625、725四种强度标号，各标号高铝水泥的强度值要求，见表5-8。高铝水泥以3 d强度为标准强度，此强度也接近其最高强度。国家标准规定，除检测上述强度值外，还应当检测其28 d强度值，并且，规定高铝水泥的28 d强度值，不得低于国家标准对3 d强度值的要求指标。

三、高铝水泥的特性与应用

高铝水泥的早期强度高，水化热大，适合于要求早期强度的工程。如抢修工程、抢工期的工程、某些临时性工程及冬期施工等。不得应用于大体积混凝土工程，以防因水化热积聚造成结构内部的高温度应力，使结构遭受破坏，也不宜在较高温度下施工，严禁用蒸气等湿热条件养护。

高铝水泥的水化产物，经过晶型转化后，强度虽然降低，但此时的产物十分稳定，将来即使是遇到高温，也不会产生明显影响结构强度的化学变化。因此高铝水泥的耐高温性能很好，适合应用于耐高温的工程。

以高铝水泥为基础，可以复合配制出多种铝酸盐系水泥。如铝酸盐自应力水泥、石膏矾土膨胀水泥、特快硬调凝水泥等，可满足工程多种特殊的要求。

高铝水泥各龄期要求强度值　　表 5-8

水泥标号	抗压强度（MPa）		抗折强度（MPa）	
	1 d	3 d	1 d	3 d
425	36.0	42.5	4.0	4.5
525	46.0	52.5	5.0	5.5
625	56.0	62.5	6.0	6.5
725	66.0	72.5	7.0	7.5

第三节　硫铝酸盐系水泥

硫铝酸盐系水泥是以硫铝酸钙为主要成分的水泥。由于其它成分的不同，不同品种硫铝酸盐水泥的性能差别较大。工程中应用较多的有快硬硫铝酸盐水泥、硫铝酸盐微膨胀水泥等。

一、快硬硫铝酸盐水泥

凡以适当成分的生料，经煅烧所得，以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料，加入适量石膏，磨细制成的早期强度高的水硬性胶凝材料，称为快硬硫铝酸盐水泥。

快硬硫铝酸盐水泥技术性质要求　　表 5-9

项　目	游离 CaO 含量	比表面积（m^2/kg）		初凝时间（min）		终凝时间（h）
指　标	不允许存在	≥380		≥25		≤3
强　度	抗压强度（MPa）			抗折强度（MPa）		
龄　期	12 h	1 d	3 d	12 h	1 d	3 d
425	29.4	34.4	41.7	5.9	6.4	6.9
525	36.8	44.1	51.5	6.4	6.9	7.4
625	39.2	51.5	61.3	6.9	7.4	7.8

快硬硫铝酸盐水泥熟料中的无水硫铝酸钙水化很快，水化过程中能够很快地与掺入的石膏反应生成钙矾石，并产生大量的氢氧化钙胶体。生成的大量钙矾石会迅速结晶形成水泥石骨架，使水泥浆凝结时间要比硅酸盐大为缩短。此后随着氢氧化钙凝胶体和水化硅酸钙的不断生成，水泥石结构不断被填充而逐渐致密，强度发展很快，从而获得较高的早期强度。

硫铝酸盐水泥早期强度高，抗硫酸盐腐蚀的能力强。因此工程中可以利用其早强的特点，应用于冬期施工、抢修或修补工程。利用其抗腐蚀的能力，配制有抗腐蚀性要求的水泥混凝土。此外，硫铝酸盐水泥的碱度低，对于需要低碱水泥的工程特别适合，如玻璃纤维水泥及混凝土的结构或构件。

二、硫铝酸盐微膨胀水泥

以适当成分的生料，经煅烧所得，以无水硫酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料，加入适量石膏，磨细制成具有一定膨胀性能的水硬性胶凝材料。

国家标准对硫铝酸盐微膨胀水泥的水中养护自由膨胀率要求 1 d 不小于 0.05%、28 d 不大于 0.50%。初凝不早于 30 min，终凝不迟于 3 h。对该水泥的细度要求为，比表面积不得小于 400 m^2/kg。工程中使用的硫铝酸盐微膨胀水泥的强度标号主要为 525，并分别要求其 1 d、3 d、28 d 的抗压和抗折强度值，不低于表 5-10 的规定要求。

硫铝酸盐微膨胀水泥的强度指标　　表 5－10

水泥标号	抗压强度（MPa）			抗折强度（MPa）		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
525	27.5	39.2	51.5	4.4	5.4	6.4

硫铝酸盐微膨胀水泥，除了具有微膨胀性能外，还具有发展强度快、早期强度高的特点。为充分发挥这些特性，常将其应用于有抗渗要求的混凝土工程、要求补偿收缩的混凝土工程、要求早强的局部结构或水泥混凝土结构物的后浇带（点）等。值得注意的是，硫铝酸盐微膨胀水泥的碱度低，对钢筋的保护性能差，不适合应用于钢筋混凝土工程。这种水泥也不适合于较高环境温度下使用，一般在 60 ℃以下使用为好。

第六章　水泥混凝土

水泥混凝土（简称混凝土）是当代最重要的建筑材料之一。它是由胶结材料、集料和水，按一定比例配制，经搅拌振捣成型，在一定条件下养护而成的人造石材。混凝土具有抗压强度高、耐久性好，原料丰富、价格低廉、生产工艺简单、使用方便等优点，这些优点使其在各种土木建筑工程中得到大量应用。

第一节　混凝土的发展概况

混凝土是随着水泥的产生而产生的，在100多年的发展历程中，混凝土材料与技术得到了不断地改进。近几十年来，各种新型生产技术与复合应用技术的不断应用，使得混凝土性能得到了更好地发挥，特别是混凝土外加剂等新技术的出现，使混凝土的应用技术前进了一大步。

目前，混凝土在性能方面主要向着轻质、高强、多功能、高性能的方向发展。在发展形式方面，土木建筑工程中也在不断扩大资源，发展多功能的复合混凝土材料。此外，推广应用预制混凝土和预拌混凝土，并使之商品化，也是今后发展的重要方向。随着现代科学技术的发展和新型测试技术的应用，人们对其内部结构和性能之间的依存关系的研究和认识也日益深入。运用现代科学理论和测试方法，将使混凝土的研究工作，从宏观研究，逐步深入到亚微观和微观层次的研究，找出材料的组分，结构和性能的本构关系，以期达到能按指定性能设计混凝土材料，或按已有的结构状态预测其性能这一目标。

混凝土的品种日益增多，它们的性能和应用也各不相同。如将种类繁多的混凝土分类，则主要的有：

一、按混凝土的结构分类

1．普通结构混凝土

由粗集料、细集料和胶结材料制成。以碎石或卵石、砂、水泥和水制成的混凝土为普通混凝土。

2．细粒混凝土

由细集料和胶结材料制成，主要用于制造薄壁构件。

3．大孔混凝土

由粗集料和胶结材料制成。集料外包胶结材料，集料彼此以点接触，集料之间有较大的空隙。这种混凝土主要用作填充材料或过滤材料。

4．多孔混凝土

这种混凝土无粗细集料，全由磨细的胶结材料和其它粉料加水拌成的料浆，用机械方法或化学方法，使之形成许多微小的气泡，后再经硬化制成，它主要用作填充或保温材料。

二、按表观密度分类

1．特重混凝土　表观密度大于2 800～3 000 kg/m^3，主要用作防辐射的屏蔽材料等。

2．普通混凝土　表观密度在2 000～2 800 kg/m^3之间，主要用于各种承重结构中。

3．轻混凝土　表观密度在 500～2 000 kg/m³ 之间，包括轻集料混凝土（ρ_0 = 800～2 000 kg/m³）和多孔混凝土（ρ_0 = 500～800 kg/m³），主要用于承重结构或保温承重结构。

4．特轻混凝土　表观密度在 500 kg/m³ 以下的多孔混凝土和用特轻集料（如膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、泡沫塑料等）制成的轻集料混凝土，主要用作保温隔热材料。

三、按用途分类

主要有结构用混凝土、隔热混凝土、装饰混凝土、耐酸混凝土、耐碱混凝土、耐火混凝土、道路混凝土、大坝混凝土、防水混凝土、海洋混凝土、防护混凝土等。

此外，还有按混凝土性能和制造工艺分类的。本章所讲述的主要是以水泥为胶结材料的普通混凝土。

第二节　普通混凝土的组成材料

普通混凝土是由水泥、水、细集料、粗集料和少量气泡组成。按其体积分配大致如图 6－1所示。

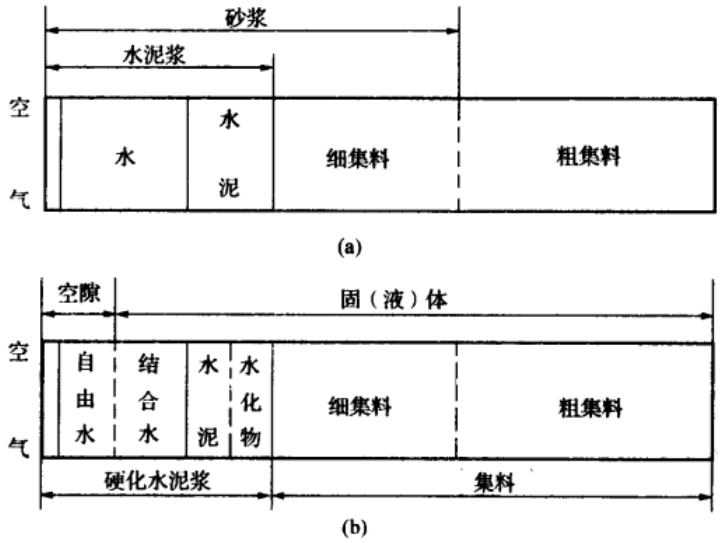


图 6－1　混凝土组成体积比例示意图

（a）新拌混凝土组成　（b）硬化混凝土组成

混凝土中的砂和石起骨架作用，称之为集料（或集料）。水泥和水调成的水泥浆在混合料中包裹集料表面，填充集料空隙，并起润滑作用，使混凝土混合料有一定的施工流动性。混凝土硬化后，水泥浆将集料粘结成坚固密实的整体，又起着胶结作用。

混凝土的技术性质，在很大程度上是由原材料的性质及其相对含量所决定的，同时，也与施工工艺（搅拌、成型、养护）有关。因此，我们必须了解原材料的性质、原材料在混凝土中的作用及其质量要求，以达到合理选材的目的。

一、水泥

1．水泥品种的选择

不同的水泥品种具有不同的特性。配制混凝土的水泥品种，应根据混凝土工程特点和所处的环境条件而定。

2．水泥强度的选择

水泥强度的选择，应与混凝土的设计强度等级相适应。经验证明，水泥强度等级应随混凝土强度等级的提高而提高。配制 C30 以下的混凝土时，可采用 32.5 级的水泥；配制 C40～C50的混凝土时，水泥的强度等级应采用 42.5 级及其以上的水泥；配制 C60 以上的混凝土，水泥的强度等级宜采用 52.5 级及其以上的水泥。往往还需要同时掺入高效减水剂等外加剂和活性磨细矿物掺合材料。

用高强度等级的水泥，配制低强度等级混凝土时，往往会使所需水泥用量减少，难以满足对混凝土和易性、密实度和耐久性的要求，必要时，也应掺入一定量的矿物掺合材料。用低强度等级水泥配制高强度等级混凝土，会使水泥用量过多，不仅在经济上浪费，还会导致混凝土收缩干裂等不良后果。

工程实际中，一般要求混凝土中最小水泥用量要满足耐久性的要求，最大水泥用量不宜超过 500 kg/m^3。

二、细集料

粒径在 0.075～4.75 mm 之间的集料为细集料，它包括天然砂和人造砂。天然砂是由自然风化而成。根据产地不同，分为河砂，海砂和山砂。

山砂颗粒多具有棱角，表面粗糙，与水泥黏结较好，但使混合料摩擦力大，流动性减小。而河砂、海砂，其颗粒多呈圆形，一般表面比较光滑和洁净，在混合集料中易于滚动，能更好地降低粗集料颗粒间的摩擦力，从而提高新拌混凝土的流动性。

拌制混凝土要选用质量好的砂子，检验砂子的质量应从以下几个方面考虑。

1．砂中有害杂质的含量

砂子本身应该质地坚硬、表面清洁。砂中常含的有害杂质，主要有：云母、硫酸盐、硫化物、有机物、黏土及淤泥等。云母呈薄片状，表面光滑，与水泥浆黏结不牢，会降低混凝土的强度；硫酸盐及硫化物、有机物对水泥及混凝土具有危害作用；黏土、淤泥及细屑多附着在砂的表面，妨碍水泥和砂的黏结，降低混凝土的强度和耐久性，并增大混凝土的干缩性，尤其是当含有黏土团块存在时，影响更为严重。此外，表观密度小于 2 000 kg/m^3 的轻物质对其使用也有不利影响。氯化物容易加剧钢筋混凝土中钢筋的腐蚀，也应进行限制。

为保证混凝土的质量，国家标准 GB/T 14684—2001《建筑用砂》对砂中的有害杂质含量做了具体规定，见表 6－1。

混凝土用砂的有害杂质及坚固性要求 **表 6－1**

项　目	指　标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
云母（按质量计），% ＜	1.0	2.0	2.0
轻物质（按质量计），% ＜	1.0	1.0	1.0
有机物（比色法）	合格	合格	合格
硫化物及硫酸盐（按 SO_3 质量计），% ＜	0.5	0.5	0.5
氯化物（以氯离子质量计），% ＜	0.01	0.02	0.06
含泥量（按质量计），%	＜1.5	＜3.0	＜5.0
泥块含量（按质量计），%	0	＜1.0	＜2.0
硫酸钠溶液干湿 5 次循环后的质量损失，% ＜	8	8	10

2．砂子的坚固性与碱活性

砂子的坚固性，是指其抵抗自然环境对其腐蚀或风化的能力，通常以硫酸钠溶液干湿循环5次后的质量损失来表示，对不同类别砂子的坚固性要求见表6－1。

砂中若含有活性氧化硅时，可能与水泥中的碱分（K_2O及Na_2O）起作用，产生碱-集料反应，并使混凝土发生膨胀开裂。因此，通常应选用无活性氧化硅的集料，必要时应按规定方法（CECS 48:93）进行集料的碱活性试验，判定集料的活性。

3．砂的粗细程度与颗粒级配

砂的粗细程度，是指不同粒径的砂粒混在一起后的平均粗细程度。根据砂的粗细程度，可分为粗砂、中砂、细砂、特细砂等。在相同用量的情况下，若砂子过粗，新拌制混凝土中表现出细颗粒较少，混凝土的稳定性能较差；若砂子过细，则砂的总表面积就较大，则需要更多的水泥浆来满足对混凝土性能的要求。

砂的粗细用细度模数表示，它是反映砂中不同颗粒总体粒径大小的间接参数，并以M_X表示。细度模数越大，表示砂越粗。根据细度模数大小范围，把砂划分为粗砂、中砂、细砂、特细砂。其中M_X在3.7～3.1为粗砂，M_X在3.0～2.3为中砂，M_X在2.2～1.6为细砂，M_X在1.5～0.7为特细砂。普通混凝土用砂的细度模数，一般在2.0～3.5之间较为适宜。

颗粒级配是指砂中不同粒径的组合情况。当砂中含有较多的粗颗粒，并以适当的中等颗粒及少量的细颗粒填充其空隙，达到空隙率及总表面积均较小时，即为较良好的级配。如图6－2。使用较好级配的砂子，不仅所需水泥浆较少，而且，还可提高混凝土的密实度和强度。

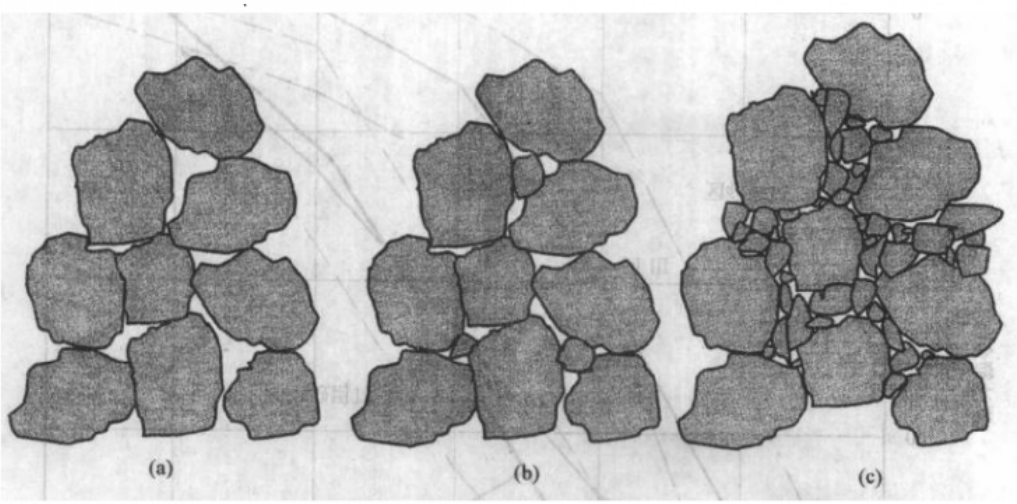


图6－2　细集料颗粒搭配图

工程实际中通常用筛分析法来评定砂的粗细和级配。筛分析法是用一套孔径为9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、及600 μm、300 μm、150 μm的标准方孔筛，将500 g干砂试样由粗到细依次过筛，然后称得余留在各号筛上的筛余量（g）。计算分计筛余百分率a_i（即某筛底上的筛余量/砂样总量）、累计筛余百分率A_i。其中累计筛余百分率是指粒径大于某尺寸的砂质量占砂总质量的比例，也称为累计筛余量。根据累计筛余可以计算细度模数，并在级配区画出试样的筛分曲线，以评定砂子的粗细和级配情况。

细度模数的计算公式为：

$$M_x = \frac{A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 - 5A_1}{100 - A_1}$$

式中 a_i——分计筛余百分率，等于该号筛的筛余量除以砂试样总量；

A_i——累计筛余百分率，等于该号筛与大于该号筛的分计筛余量之和。

砂子的颗粒级配情况常以级配区或级配曲线表示。国家规范将细度模数为3.7～1.6的普通混凝土用砂，以4.75 mm和600 μm筛孔的累计筛余量分成三个级配区，如表6-2、图6-3。

细集料级配分布表 **表6-2**

累计筛余（%） / 方筛孔径	级配区		
	1	2	3
9.50 mm	0	0	0
4.75 mm	10～0	10～0	10～0
2.36 mm	35～5	25～0	15～0
1.18 mm	65～35	50～10	25～0
600 μm	85～71	70～41	40～16
300 μm	95～80	92～70	85～55
150 μm	100～90	100～90	100～90

注 1. 砂的实际颗粒级配与表中所列数字相比，除4.75 mm和600 μm筛挡外，可以略有超出，但超出总量应小于5%。

2. 1区人工砂中150 μm筛孔的累计筛余可以放宽到100～85，2区人工砂中150 μm筛孔的累计筛余可以放宽到100～80，3区人工砂中150 μm筛孔的累计筛余可以放宽到100～75。

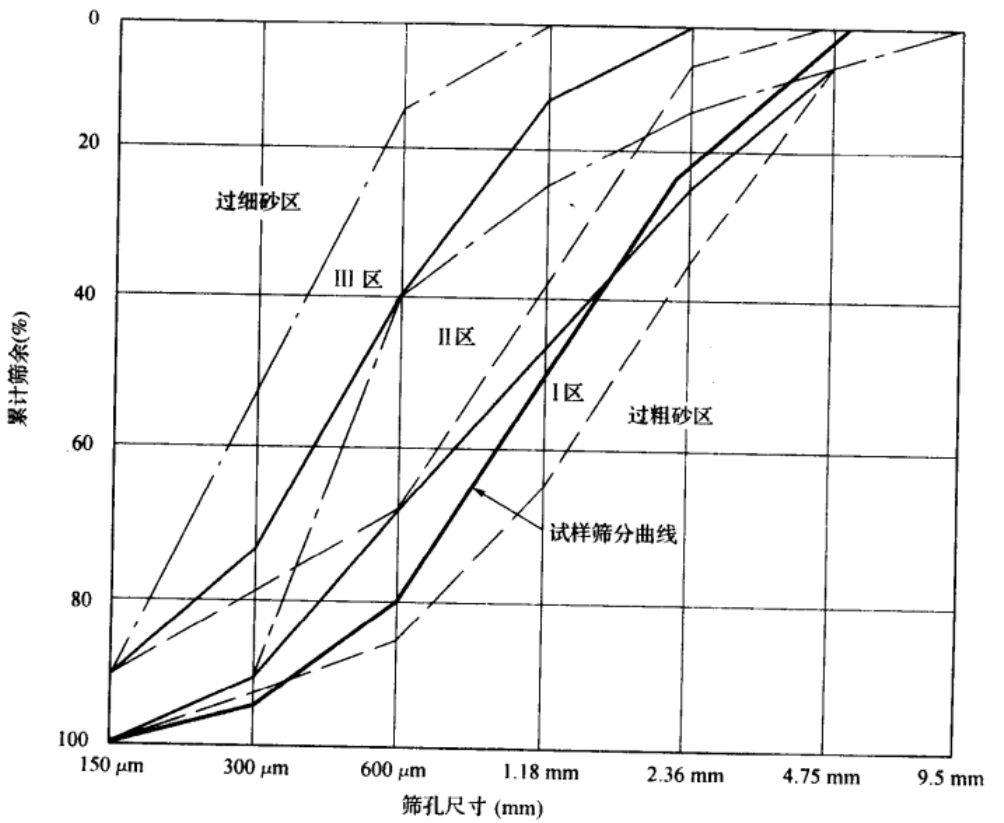


图6-3 细集料级配曲线

根据表 6－2 可以绘制出砂的对应筛分曲线图 6－3。为保证混凝土的技术性能，所用砂的颗粒级配应在表 6－2 和图 6－3 所示的某一级配区以内。表中所列累计筛余量百分率，除 4.75 mm 和 600 μm 筛号外，各级配区允许稍有超出分界线，但超出的总量不得大于 5%。

一般认为，处于Ⅱ区级配的砂，其粗细适中，级配较好。Ⅰ区砂含粗颗粒较多，属于粗砂，适于配制水泥用量较多的富混凝土和低流动性混凝土。处于Ⅲ区的砂属于砂细，用该砂拌制的混凝土水泥用量较大，且干缩大。

从筛分曲线也可看出砂的粗细，筛分曲线超过第Ⅰ区往右下偏时，表示砂过粗。筛分曲线超过第Ⅲ区往左上偏时则表示砂过细。在工地附近只有细砂的情况下，只要级配符合要求，可在控制砂用量、用水量以及在保证施工质量的条件下，利用细砂拌制混凝土。

砂的级配必须合理，否则难以配制出性能良好的混凝土，当现有的砂级配不良时，可进行适当的筛分调整，必要时还可通过人工掺配达到合理级配。

例题：某砂样进行烘干后称取干砂 500 克，经筛分试验结果如下：

筛分析计算关系 **（例表）**

筛孔尺寸（mm）	分计筛余量（g）	分计筛余（%）	累计筛余（%）
4.75 mm	5	$a_1 = 5/500 = 1$	$A_1 = a_1 = 1$
2.36 mm	100	$a_2 = 100/500 = 20$	$A_2 = a_1 + a_2 = 21$
1.18 mm	150	$a_3 = 150/500 = 30$	$A_3 = A_2 + a_3 = 51$
600 μm	145	$a_4 = 145/500 = 29$	$A_4 = A_3 + a_4 = 80$
300 μm	80	$a_5 = 80/500 = 16$	$A_5 = A_4 + a_5 = 96$
150 μm	20	$a_6 = 20/500 = 4$	$A_6 = A_5 + a_6 = 100$

根据筛分结果进行计算，该砂的细度模数在 3.7～3.1 范围内，故可初步判定为粗砂。

在级配区内画出该砂的筛分曲线，如图 6－3。该曲线落在Ⅰ区（粗砂区）内（300 μm 筛孔尺寸有少量超出），说明该砂的确为粗砂，级配基本合格。

对于人工砂，除了要求级配和有害杂质含量应符合规定外，还要求其人工砂的石粉含量和泥块含量、压碎值指标、亚甲蓝 MB 值等必须满足规定要求，具体要求见表 6－3－1 和表 6－3－2。

人工砂的石粉含量和泥块含量 **表 6－3－1**

项目				指标		
				Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
1	亚甲蓝试验	MB 值＜1.4 或合格	石粉含量（按质量计）（%）	＜3.0	＜5.0	＜7.0
2			泥块含量（按质量计）（%）	0	＜1.0	＜2.0
3		MB 值≥1.4 或合格	石粉含量（按质量计）（%）	＜1.0	＜3.0	＜5.0
4			泥块含量（按质量计）（%）	0	＜1.0	＜2.0

注：根据使用地区和用途，在试验验证的基础上，可由供需双方协商确定

人工砂压碎值指标 **表 6－3－2**

项目	指标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
单级最大压碎指标（%）＜	20	25	30

注：亚甲蓝 MB 值，是用于判定人工砂中粒径小于 75 μm 颗粒含量，主要是泥土与被加工母岩化学成分相同的石粉指标。

三、粗集料

集料粒径大于 4.75 mm 的为粗集料。普通混凝土常用的粗集料有卵石、碎石等天然粗集料，此外还有人造集料及工业废渣破碎集料等。

卵石是由自然风化、水流搬运和分选、堆积形成的，粒径大于 4.75 mm 的集料。碎石是天然岩石或卵石经机械破碎、筛分制成的，粒径大于 4.75 mm 集料。应用于混凝土中的普通碎石表观密度应大于 2 500 kg/m^3，松散堆积密度大于 1 350 kg/m^3，空隙率小于 47%。

卵石表面光滑少棱角，空隙率和表面积均较小，它所拌制的混凝土混合料流动性较大，且水泥浆用量较少。但是，卵石与水泥浆的界面胶结能力较差，表现为混凝土强度较低。

碎石是由天然岩石经破碎、筛分而得。碎石表面粗糙，富有棱角，集料的空隙率和总表面积较大，与卵石混凝土比较，用碎石拌制混凝土混合物集料间的摩擦力较大，对混凝土的流动阻滞性较强，因此所需包裹集料表面和填充空隙的水泥浆较多。碎石与水泥浆的界面胶结能力较强，表现为所配制混凝土的强度较高。

为保证混凝土的强度和耐久性，国家标准 GB/T 14685—2001《建筑用卵石、碎石》中根据各项技术指标对混凝土用粗集料划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类集料。其中Ⅰ类适用于 C60 以上的混凝土；Ⅱ类适用于 C30～C60 的混凝土；Ⅲ类适用于 C30 以下的混凝土。并对其各项技术指标有具体要求，主要有以下几项质量指标：

1. 粗集料的强度及坚固性

为满足混凝土的强度要求，所用粗集料应质地致密，具有足够的强度。集料的强度可用岩石立方体强度或压碎指标表示。在选择采石场，或对粗集料强度有严格要求，或对质量有争议时，宜用岩石立方体强度作检验。对经常性的生产质量控制则用压碎指标值检验较为简便。

集料立方强度试验，是用母岩制成 50 mm × 50 mm × 50 mm 立方体，或直径与高度为 50 mm圆柱体试样，浸泡水中 48 小时，待吸水饱和后进行抗压试验。根据《普通混凝土用碎石或卵石质量标准》的规定，其抗压强度与设计要求的混凝土强度等级之比，不应低于 1.5。

压碎指标是将一定量气干状态下粒径为 10～20 mm 的石子装入一定规格的圆筒内，在压力机上施加荷载到 200 kN，卸荷后称取试样重量（m_0），再用孔径为 2.36 mm 的筛筛除被压碎的细屑，称取试样的筛余量（m_1）。

$$\text{压碎指标} = (m_0 - m_1)/m_0 \times 100\%$$

压碎指标值越小，表明石子的强度越高。对不同强度等级的混凝土，所用石子的压碎指标应符合规范中的规定。压碎值指标应满足表 6－4－1。

水泥混凝土用碎石或卵石压碎值及坚固性指标　　**表 6－4－1**

项　目	指　标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
碎石压碎指标 <	10	20	30
卵石压碎指标 <	12	16	16
硫酸钠溶液干湿 5 次循环后质量损失（%）<	5	8	12

粗集料的坚固性是指在气候、外力和其它物理力学因素作用（如冻融循环作用）下，集料抗碎裂的能力。坚固性试验是用硫酸钠溶液法检验，试样经五次干湿循环后，其重量损失也不得超过规范的有关规定。

此外，对于重要工程，还要求粗集料的抗碱集料反应能力。通常要求经碱集料反应试验

后，由卵石、碎石制备的试件无裂缝、酥裂、胶体外溢等现象，在规定试验龄期的膨胀率，应小于0.1%。

2. 有害杂质

粗集料中的有害杂质主要有：黏土、淤泥及细屑，硫酸盐及硫化物，有机物质，蛋白石及其它含有活性氧化硅的岩石颗粒等。它们的危害作用与在细集料中相同。对各种有害杂质的含量都不应超出规范的规定。其技术要求及其有害物质含量见表6-4-2。

水泥混凝土用粗集料的有害物质含量技术要求 **表6-4-2**

项　目	指　标		
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
含泥量（按质量计），%	<0.5	<1.0	<1.5
泥块含量（按质量计），%	0	<0.5	<0.7
有机物	合格	合格	合格
硫化物及硫酸盐（按SO_3质量计），% <	0.5	1.0	1.0
针片状颗粒含量（按质量计），% <	5	15	25

注：1. 平均粒径：该粒级上、下限的平均值。含泥量：粒径小于75 μm的颗粒含量。

2. 泥块含量：原粒径大于4.75 mm，经水浸、手捏后小于2.36 mm的颗粒含量。

混凝土还要求粗集料中的针状（颗粒长度大于相应粒级的平均粒径的0.4倍）和片状（厚度小于平均粒径的0.4倍）颗粒含量不得超标。针片状颗粒易折断，其含量多时，会使混凝土的强度降低，还会降低新拌混凝土的流动性。集料中针状片状颗粒含量，应符合规范中的规定。

对于重要结构工程的水泥混凝土用粗集料，应进行上述质量指标的试验检测。

3. 最大粒径及颗粒级配

（1）最大粒径

粗集料中公称粒级的上限为该粒级的最大粒径。当粗集料的质量相同时，随着最大粒径增大，粗集料的总表面积会减小，如果集料的级配好，则空隙率也会减小，这不仅可以节约水泥用量，还有助于提高混凝土的密实度，减少发热量和混凝土的收缩。所以在条件允许时，应选用较大粒径的粗集料。但是最大粒径过大时空隙率可能增大，试验证明，当最大粒径大于80 mm时，节约水泥效果不明显。

最大粒径的选用，还要受结构上诸因素和施工条件等方面的限制。根据我国钢筋混凝土施工规范规定：混凝土用粗集料的最大粒径不得大于结构物最小断面的最小边长的1/4；不得大于钢筋最小净距的3/4。另外还受搅拌机以及输送管道条件的限制。如果最大粒径太大，会损坏搅拌机叶片，运输中产生离析，堵塞泵管等。对大体积混凝土，常用大尺寸的毛石来填充，这属于特殊施工处理措施。

（2）颗粒级配

粗集料的级配原理和要求与细集料基本相同。级配试验采用筛分法测定，即用2.36、4.75、9.5、16、19.0、26.5、31.5、37.5、53.0、63.0、75.0和90 mm等十二种孔径的方孔筛进行筛分。

石子的级配可分为连续级配和单粒级配。

连续级配是石子粒级呈连续性，即颗粒由小到大，每级石子占一定比例。用连续级配的集料配制的混凝土混合料，和易性较好，不易发生离析现象。此种级配是目前最常用的。

单粒级配也叫间断级配。单粒级配是人为地剔除集料中某些粒级颗粒，从而使集料级配不连续，大集料空隙由小几倍的小粒径颗粒填充，降低石子的空隙率。由单粒级配制成的混凝土，可以节约水泥。由于其颗粒粒径相差较大，混凝土混合物容易产生离析现象，导致施工困难。如混凝土混合物为低流动性或干硬性的，同时采用机械强力振捣时，采用单粒级配是合适的。

混凝土用碎石与卵石的颗粒级配和最大粒径规定见表 6-4-3。

混凝土用碎石与卵石的颗粒级配要求 **表 6-4-3**

公称粒径	累计筛余(%) / 方筛孔(mm)	2.36	4.75	9.5	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53.0	63.0	75.0	90
连续粒级	5～10	95～100	80～100	0～15	0								
	5～16	95～100	85～100	30～60	0～10	0							
	5～20	95～100	90～100	40～80	—	0～10	0						
	5～25	95～100	90～100	—	30～70	—	0～5	0					
	5～31.5	95～100	90～100	70～90	—	15～45	—	0～5	0				
	5～40	—	95～100	70～90	—	30～65	—	—	0～5	0			
单粒粒级	5～20		95～100	85～100		0～15	0						
	16～31.5		95～100		85～100			0～10	0				
	20～40			95～100		80～100			0～10	0			
	31.5～63				95～100			75～100	45～75		0～10	0	
	40～80					95～100			70～100		30～60	0～10	0

注：上述各级配中，孔径为该级配最大粒径一号筛上的筛余必须为为。

四、混凝土用水

拌制和养护混凝土的用水中，不得含有影响水泥正常凝结与硬化的有害杂质，如油脂、糖类等。凡是能饮用的自来水和清洁的天然水，都能用来拌制和养护混凝土。污水、pH 值小于 4 的酸性水、含硫酸盐（按 SO_3 计）超过 1% 的水均不得使用。若对水质有疑问时，可将该水与洁净水分别制成混凝土试块，然后进行强度对比试验，如果该水制成的试块强度不低于洁净水制成的试块强度，就可用此水来拌制混凝土。海水中含有硫酸盐、镁盐和氯化物，对水泥石有侵蚀作用，对钢筋也会造成锈蚀，因此，一般不得用海水拌制混凝土。

此外，为防止混凝土的碱-集料反应，应对混凝土所用全部原材料中所含的总碱量进行控制。对潮湿环境中使用的混凝土结构，每立方混凝土中的含碱量（以当量 Na_2O 计）不得超过 3.5 kg，对重要结构或含碱环境，不得超过 3.0%。

第三节　新拌混凝土混合料的性质

混凝土在未凝结硬化以前称为混凝土混合料（亦称混合物、拌和物、拌和料或新拌混凝土等）。混凝土混合料，必须具有良好的和易性，以保证获得良好的浇筑质量。

一、混凝土混合料的和易性

和易性是一项评定混凝土混合料的综合技术性质，它包括流动性、粘聚性和保水性等多方面。

流动性　是指混合料在本身自重或在机械振捣的外力作用下产生流动或坍落，能均匀密实地填满模板的性质。流动性的大小与混凝土中各种组成材料的性质与相对比例有关，加水量的多少对流动性尤其敏感。

粘聚性　是指混合料中各颗粒间具有一定的相互粘聚力，在运输和浇筑过程中，能够抵抗分层离析，使混凝土保持整体均匀的性能。粘聚性不好时，砂浆与石子容易分离，振捣后会造成蜂窝、空洞等现象，严重影响工程质量。粘聚性的好坏与各组成材料的比例有关，水泥用量和集料级配对粘聚性比较敏感。

保水性　是指混合料在施工过程中保持水分的能力。保水性好的混合料不易产生严重泌水现象。保水性差的混合料，其泌水倾向大，泌水通道在混凝土硬化后形成渗水通道，即毛细孔，从而降低混凝土的抗渗性和抗冻性。混凝土保水性较差时，其表面容易形成疏松层，影响与其它材料的界面黏结。当再在上面浇注混凝土时，还会影响新老混凝土的黏结，形成薄弱的夹层。另外，泌水还会导致在粗集料及钢筋下部形成水囊或水膜，影响粗集料、钢筋与砂浆的粘结。混凝土保水性的好坏与水泥性能和集料级配有关。

二、混凝土混合料和易性的检测

到目前为止，还没有指标能全面准确地反映混凝土拌和物的和易性，一般常用坍落度来表示其流动性的大小，粘聚性与保水性则根据经验，通过试验或现场的观察来间接判断和评定。

1．坍落度法

坍落度法是最常用的测定混合料流动性的一种方法。坍落度是用一个截头圆锥筒（简称坍落度筒，见图 6－4）测定的。测定时，将混合料分 3 次装入坍落度筒中，每次装料约 1/3 筒高，用捣棒穿捣 25 次，最后刮平，垂直提起坍落度筒，混合料在自重作用下会产生坍落，坍落的高度（以 mm 计）即为混合料的坍落度。

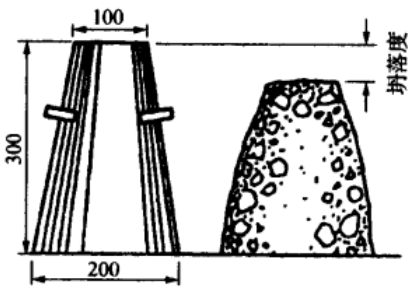


图 6－4　混凝土坍落度试验示意图

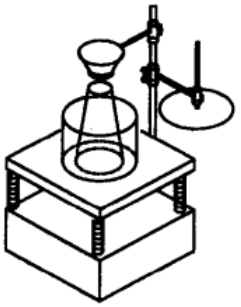


图 6－5　混凝土维勃稠度试验示意图

在进行坍落度试验时，还需同时观察黏聚性和保水性。用捣棒在已坍落的混合料锥体的一侧轻击，如果发生局部突然倒塌，部分崩裂，或发生石子离析现象，则说明混合料的粘聚性差。观察锥体下部是否有水或水泥浆析出，根据析水情况评定混合料的保水性。

利用坍落度筒测流动性的方法，只适用于粗集料最大粒径小于 40 mm，坍落度值不小于 10 mm 的混合料。

根据坍落度不同，可将混合料分为大流动性混凝土（坍落度大于 160 mm）；流动性混凝土（坍落度为 100～150 mm）；塑性混凝土（坍落度在 10～90 mm）；干硬性混凝土（坍落度小于 10 mm）。测定干硬性混凝土混合料的和易性，应采用维勃稠度法。

2. 维勃稠度法（VB法）

维勃稠度测试方法是：开始在坍落度筒中按规定方法装满混合物，垂直提起坍落度筒，在混合物试体顶面放一透明圆盘，开启振动台，同时用秒表计时，到透明圆盘的底面完全为水泥浆所布满时，停止秒表，关闭振动台。此时，可认为混凝土混合物已密实。所读秒数，称为维勃稠度。该法适用于粗集料最大粒径不超过 40 mm，维勃稠度在 5～30 s 之间的混凝土混合料稠度测定。

三、混凝土混合料和易性的选择

混合料坍落度的选择，要根据构件截面大小，钢筋疏密和捣实方法来确定。当截面尺寸较小或钢筋较密，或采用人工插捣时，坍落度可选择大些。反之，如构件截面尺寸较大，钢筋较疏，或采用振动器振捣时，坍落度可选择小些。我国《钢筋混凝土工程施工及验收规范》规定，混凝土浇注时的坍落度宜按表 6－5 选用。

混凝土浇注时所需坍落度参考值　　表 6－5

结　构　类　型	坍落度（mm）
基础或地面垫层，不配筋的厚大结构（挡土墙、基础或厚大块体），配筋稀疏的结构	10～30
板、梁，大中型截面的柱子等	30～50
配筋密列的结构（薄壁、斗仓、筒仓、细柱等）	50～70
配筋特密的结构	70～90

注：本表推荐值适合于机械振捣施工工艺，采用人工振捣时应适当增大坍落度；当采用泵送混凝土工艺输送混凝土时，为满足泵送对和易性的要求，要求混合料具有高流动性，混凝土的坍落度应为 120～180 mm。如果是运输搅拌罐车运送，坍落度宜为 60～100 mm。水下灌注混凝土要求坍落度为 160～200 mm。

四、影响混合料和易性的因素

1. 水泥浆的数量

在混合料中，水泥浆包裹集料表面，填充集料空隙，起到润滑集料和提高混合料流动性的作用；在水灰比不变的情况下，单位体积混合料内，随着水泥浆的增多，混合料的流动性增大。若水泥浆过多，超过集料表面的包裹限度，就会出现流浆现象，这既浪费水泥，又会降低混凝土的性能。若水泥浆太少，达不到包裹集料表面和填充空隙的程度，混凝土就会粘聚性变差，流动性降低，以至产生崩塌现象，还会使混凝土的强度和耐久性降低。通常，混合料中水泥浆的数量，以满足流动性要求为宜。

2. 水泥浆的稠度

水泥浆的稀稠，主要决定于水灰比的大小。水灰比较小，则水泥浆较稠，混合物流动性就较小，即具有较好的粘聚性与保水性。若水灰比过小，混凝土过于干稠，不能保证施工的密实程度，影响混凝土最终质量。若水灰比过大，尽管使混合料的流动性增加，但使粘聚性和保水性变差，同时会降低混凝土的强度和耐久性。实际上，水灰比的大小是根据混凝土的强度和耐久性确定的。工程中，不可为提高混合料的流动性而单独加水（即增大水灰比），而要采取保持水灰比不变，增加水泥浆用量的方法提高混合料的流动性。

综合上述两因素，可以看出混凝土的和易性与用水量有直接的关系，通常随着混凝土中用水量的提高，坍落度会显著增大（即流动性增大）。因此，在一定范围内可以利用改变用水量，来改变混凝土的坍落度。混凝土坍落度与用水量的关系见表 6－9 和图 6－6。

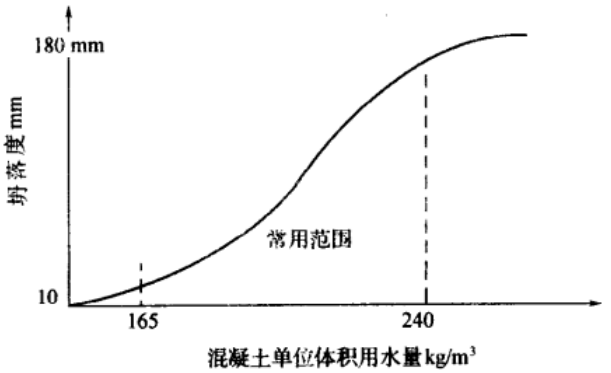


图 6-6　混凝土单位体积用水量与坍落度的关系

3．砂率的影响

砂率是指砂的用量占砂石总用量的百分率。在混合料中，砂是用来填充石子间空隙，并减小石子之间摩擦阻力的。在水泥浆一定的条件下，若砂率过大，则集料的总表面积及空隙率增大，混凝土混合物就显得干稠，流动性小。如要保持一定的流动性，则要多加水泥浆。若砂率过小，砂浆量不足，不能在粗集料的周围形成足够的砂浆层起润滑和填充作用，也会降低混合料的流动性，同时会使粘聚性、保水性变差，使混凝土混合料显得粗涩，粗集料离析，水泥浆流失，甚至出现溃散现象。因此，砂率既不能过大，也不能过小，应通过计算，查表或试验找出最佳（合理）砂率。混凝土坍落度与砂率的关系，见表 6-6，图 6-7。混凝土水泥用量与砂率的关系，见图 6-8。

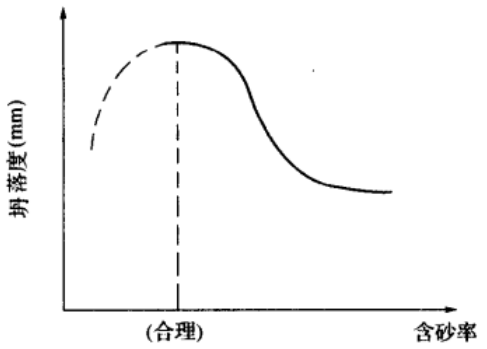


图 6-7　混凝土含砂率与坍落度的关系

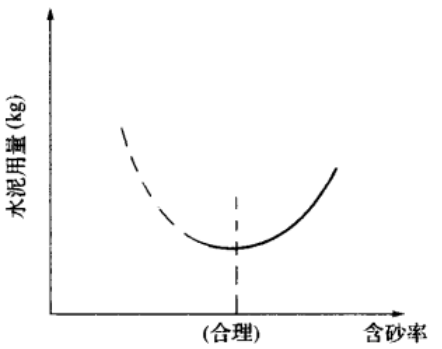


图 6-8　混凝土砂率与水泥用量的关系

4．其它影响因素

除上述影响因素外，水泥品种，集料种类，粒形和级配，以及外加剂等，都对混凝土混合料的和易性有一定影响。水泥的标准稠度用水量大，则混合物的流动性小。集料的颗粒较大，形状较圆，表面较光滑及级配较好时，则混合物的流动性较大。此外，在混凝土混合料中加入外加剂（如减水剂）时，能显著地改善和易性。

混凝土混合料的和易性还与时间、温度有关。混合料拌制后，随时间的延长，流动性减小。这种混凝土流动性，随时间而降低的特性，称为坍落度损失。温度越高，水分丢失越快，坍落度损失越大。尤其是掺减水剂的混凝土坍落度损失更为显著，在远距离运输或泵送混凝土施工中，应特别注意混合料的坍落度损失。

第四节　硬化混凝土的性质

硬化混凝土是混合料中的水泥凝结硬化后，将集料黏结为密实坚硬的整体，其基本构造见图 6－9。为满足工程的要求，硬化后的混凝土应具有良好的力学性能和耐久性能。

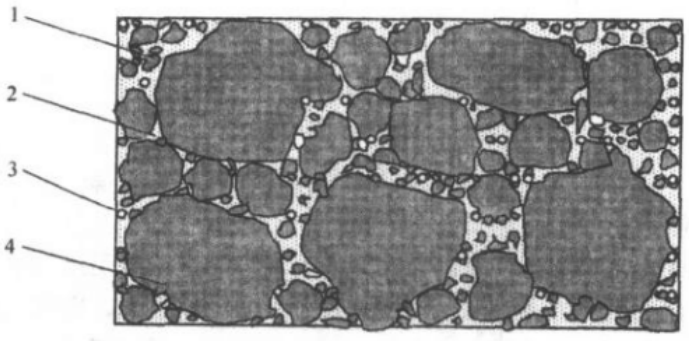


图 6－9　混凝土内部构造示意图

1—细集料；2—水泥浆；3—气孔；4—粗集料

一、硬化混凝土的力学性质

1．混凝土的强度

强度是混凝土硬化后的主要力学性能。由于混凝土是多种材料的组合体，结构复杂可变，使混凝土构成为非均质的材料。在未施加荷载前，由于混凝土凝结硬化过程中水泥砂浆的收缩，或因泌水在集料下部形成水囊，而导致集料界面可能出现微裂缝，这些均为混凝土的原生缺陷。施加外力时，微裂缝周围出现应力集中，随着外力的增大，裂缝就会延伸和扩展，最后导致混凝土的破坏。

描述混凝土强度的指标有：立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度等。

（1）抗压强度标准值和强度等级

在混凝土的诸多强度中，其中抗压强度最大，抗拉强度最小，抗拉强度约为抗压强度的 1/8～1/20。因此，在建筑工程中，混凝土多作为受压材料使用。工程中提到的混凝土强度，一般指的是混凝土抗压强度，如为其它强度时应注明。

a．立方体抗压强度（f_{cu}）

按照标准的制作方法制成边长为 150 mm 的立方体试件，在标准（温度 20±2 ℃，相对湿度 90%以上）养护条件下，养护至 28 d 龄期，按照标准的测定方法测定其抗压强度值，称为“混凝土立方体试件抗压强度”（简称立方抗压强度，以 f_{cu} 表示）。

测定混凝土立方体试件抗压强度，也可以按粗集料最大粒径的尺寸而选用不同的试件尺寸。但在计算其抗压强度时，应乘以换算系数，以得到相当于标准试件的试验结果（选用边长为 100 mm 的立方体试件，换算系数为 0.95；选用边长为 200 mm 的立方体试件，换算系数为 1.05）。

b．立方体试件抗压强度标准值（$f_{cu,k}$）

混凝土“立方体试件抗压强度标准值”，按我国现行国标（GBJ 107—87）和（GBJ

10—89）的定义，按照标准方法制作和养护的边长为 150 mm 的立方体试件，在 28 天龄期，用标准试验方法测定的抗压强度总体分布中的一个值，强度低于该值的百分率不超过 5%（即具有 95%保证率的抗压强度），以 N/mm^2 即 MPa 计。

立方体抗压强度（f_{cu}），只是一组混凝土试件抗压强度的算术平均值，难以表明一批量混凝土的总体强度情况。而立方体抗压强度标准值（$f_{cu,k}$），是按数理统计方法确定，表示所代表的整批混凝土，具有不低于 95%保证率的立方体抗压强度。

c. 混凝土的强度等级

混凝土的“强度等级”是根据“立方体抗压强度标准值”来确定的。

我们现行规范（GBJ 10—89）规定，普通混凝土按立方体抗压强度标准值划分为：C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55 和 C60，12 个强度等级。

（2）混凝土的轴心抗压强度（f_{cp}）

混凝土的强度等级是采用立方体试件确定的，但实际工程中，钢筋混凝土结构形状极少是立方体的，大部分是棱柱体形或圆柱体型。为了使测得的混凝土强度接近于混凝土结构的实际情况，在钢筋混凝土结构计算中，计算轴心受压构件（例如：柱子、衍架的腹杆等）时，都是采用混凝土的轴心抗压强度作为依据。

我国现行标准（GBJ 81—85）规定，采用 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体作为标准试件。同条件下，混凝土的轴心抗压强度比立方体抗压强度低。这是随着高宽比增大，环箍效应减弱，当高宽比达到一定值后，强度不再降低。此时在试件的中间区段已无环箍效应，成了纯压状态，而且，过高的试件在破坏前，可能由于较大的附加偏心而产生失稳，这些均会降低其抗压试验强度值。

试验证明，棱柱体强度约为立方体强度的 70%～80%。

（3）劈裂抗拉强度（f_{ts}）

由于混凝土轴心抗拉强度的试验设备难以保证使混凝土处于纯受拉状态，我国现行标准规定，采用标准试件 150 mm 立方体，按规定的劈裂抗拉试验装置检测劈拉强度。其劈拉强度计算公式为：

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637\frac{F}{A}$$

式中 f_{ts}——混凝土的劈拉强度（MPa）；

F——破坏荷载（N）；

A——试件劈裂面面积（mm^2）；

（4）混凝土的抗折强度（f_{tf}）

混凝土的抗折强度，是指处于受弯状态下混凝土抵抗外力的能力。由于混凝土的脆性，使其在断裂前无明显的弯曲变形，故称为抗折强度。通常混凝土的抗折强度是利用 150 mm×150 mm×550 mm 的试梁，在三分点加荷状态下测得的，其试件受力简图见图 6-10。试件受弯状态下的抗折强度计算公式为：

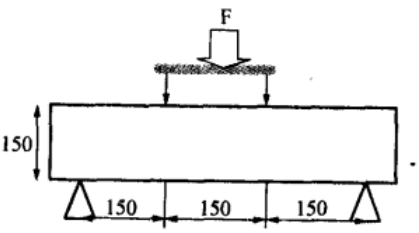


图 6-10

混凝土抗折强度试件受力简图（三分点加荷方法）

$$f_{tf} = FL/bh^2$$

式中 F——所承受的最大垂直荷载（N）；

L——试梁两支点间的间距（450 mm）；

h——试梁高度（150 mm）；

b——试梁宽度（150 mm）。

若采用中间集中单点加荷方法，所检测的抗折强度值，应乘以折减系数 0.85 后作为标准抗折强度值。

我国《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTJ 012—94）规定，道路与机场道面用水泥混凝土的强度控制指标以抗折强度为准，抗压强度仅作为参考指标。上述用途的水泥混凝土必须满足规范和设计要求的抗折强度。

2. 影响混凝土强度的因素

在荷载作用下，混凝土中首先引起破坏的有三种情况。水泥石的破坏，低强度等级混凝土的破坏属于此类；界面破坏，粗集料与砂浆界面破坏是普通混凝土的常见形式；集料首先破坏，它是轻集料混凝土的破坏形式。

普通混凝土首先在界面破坏，原因是界面的水泥石晶粒粗大，孔隙多，大孔也多，是收缩裂缝集中区，也是刚度变化的突变区，因此，使集料界面处于薄弱环节。有时为提高界面强度，采用净浆裹石或造壳增强工艺来达到提高混凝土强度的目的。界面强度与水泥的强度，水灰比及集料的性质有密切关系。此外，混凝土的强度还受施工质量、养护条件及龄期等多种因素的影响。

其中影响混凝土强度的主要因素有：

（1）水灰比与水泥强度等级

水泥是混凝土中的活性组分，其强度大小直接影响着混凝土强度的高低。在配合比相同的条件下，所用的水泥强度等级越高，制成的混凝土强度也越高。当用同一品种同一强度等级的水泥时，混凝土的强度主要取决于水灰比。因为水泥水化时所需的结合水，一般只占水泥重量的 23%左右，但在拌制混凝土混合物时，为了获得必要的流动性，常需用较多的水（约占水泥重量的 40%～70%）。混凝土硬化后，多余的水分蒸发或残存在混凝土中，形成毛细管、气孔或水泡，它们减少了混凝土的有效断面，并可能在受力时，在气孔或水泡周围产生应力集中，使混凝土强度下降。在保证施工质量的条件下，水灰比愈小，混凝土的强度就愈高。但是，如果水灰比太小，拌和物过于干涩，无法保证浇筑质量，将使混凝土中出现较多的蜂窝、孔洞，显著降低混凝土的强度和耐久性。试验证明，混凝土的强度，随水灰比增大而降低，并呈曲线关系，与水泥强度呈直线关系。其关系见图 6－11。

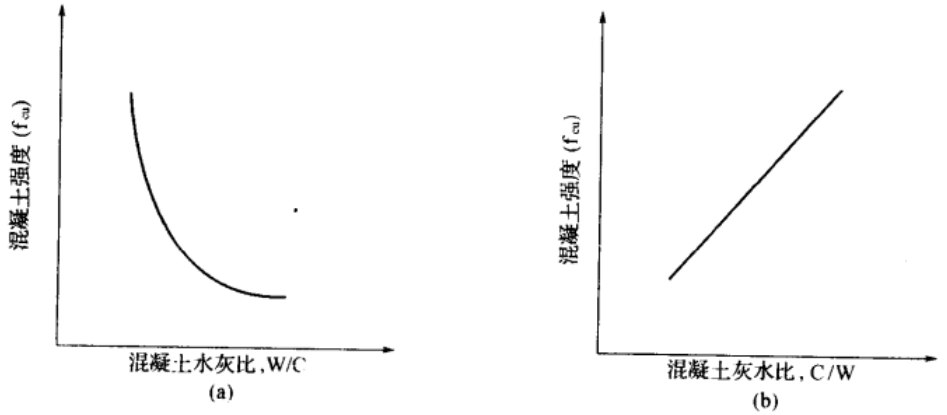


图 6－11　混凝土强度与水灰比、灰水比的关系曲线

（a）强度与水灰比的关系　　（b）强度与灰水比的关系

混凝土的强度还受界面强度的影响，水泥石与集料的黏结情况与集料种类和集料表面性质有关，表面粗糙的碎石比表面光滑的卵石（砾石）黏结力大，硅质集料与钙质集料也有所区别，因而，在其它条件相同的情况下，碎石混凝土的强度，比卵石混凝土的强度高。

根据大量试验建立起来的常用的混凝土强度公式：

$$f_{cu,o} = \alpha_a f_{ce}(C/W - \alpha_b)$$

式中 $f_{cu,o}$——混凝土 28 天抗压强度（MPa）；

f_{ce}——水泥的实际强度（MPa）；

C/W——灰水比；

C——每立方米混凝土中水泥用量（kg）；

W——每立方米混凝土中用水量（kg）。

α_a、α_b 经验系数，与集料品种有关，其数值通过试验求得。《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ/T55—2000）提供的 α_a、α_b 经验值为：

采用碎石：$\alpha_a = 0.46$、$\alpha_b = 0.07$

采用卵石：$\alpha_a = 0.48$、$\alpha_b = 0.33$

利用该公式，可根据所用的水泥强度和水灰比来估算所制成混凝土的强度，也可根据所用水泥强度，与配制的混凝土强度来计算应采用的水灰比。

（2）养护的温度和湿度

混凝土强度的增长，是水泥的水化、凝结和硬化的过程，必须在一定的温度和湿度条件下进行。

在保证足够湿度情况下，不同养护温度，其结果也不相同。温度高，水泥凝结硬化速度快，早期强度高，所以在混凝土制品厂，常采用蒸气养护的方法提高构件的早期强度，提高模板和场地周转率。低温时，水泥混凝土硬化比较缓慢，当温度低至 0 ℃以下时，硬化不但停止，且具有受冻破坏的危险。因此，混凝土浇筑完毕后，必须保持适当的温度和湿度，以保证混凝土不断地凝结硬化。

水泥的水化必须在有水的条件下进行。如果新浇筑混凝土的周围环境温度不够，混凝土会失水干燥而影响水泥水化作用的正常进行，甚至停止水化。这不仅严重降低混凝土的强度，而且，因水化作用未能完成，使混凝土结构疏松，渗水性增大，或形成干缩裂缝，从而影响耐久性。

为使混凝土正常硬化，必须在成型后一定时间内，维持周围环境有一定温度和湿度。冬天施工要对新浇筑混凝土采取保温措施。自然养护的混凝土，尤其是夏天，要经常洒水保持潮湿，用草袋或塑料膜覆盖，也可用养护剂保护。

（3）龄期

混凝土在正常养护条件下，强度随着龄期的增加而提高。初期强度增长较快，后期增长缓慢，只要保持适当的温度和湿度，龄期延续很久时，其强度仍有所增长。

普通水泥制成的混凝土，在标准条件养护下，混凝土强度的发展，大致与其龄期的对数成正比关系（龄期不小于三 d）：

$$f_n = \frac{f_{28} \cdot \lg n}{\lg 28}$$

式中 f_n——nd 龄期混凝土的抗压强度；

f_{28}——28 d 龄期混凝土的抗压强度；

$\lg n$、$\lg_{28}$——n（n 不小于 3）、28 的对数。

影响混凝土强度因素很多，很难用一个公式全部概括，该公式只是在推断混凝土强度值时参考。

（4）试验条件

试验条件对测定混凝土强度也有影响。如试件尺寸，表面的平整度，温湿度及加荷速度等，测定时，要严格遵照试验规程的要求进行，保证试验的准确性。

3．提高混凝土强度的措施

（1）选用高强度水泥和低水灰比

在满足施工和易性和混凝土耐久性要求条件下，尽可能降低水灰比和提高水泥强度，这对提高混凝土的强度是有效的。

（2）掺用混凝土外加剂

在混凝土中掺入减水剂，可减少用水量，提高混凝土强度；掺入早强剂，可提高混凝土的早期强度。

（3）采用湿热处理

湿热处理可分为蒸气养护和蒸压养护两类。

a．蒸气养护：将混凝土放在低于 100 ℃的常压蒸气中养护。由于有足够的湿度和较高的温度，因此，经 16～20 h 养护后，其强度可达正常条件下，养护 28 d 强度的 70%～80%。蒸气养护最适合于掺活性混合材料的水泥，因为在湿热条件下，可加速活性混合材料与水泥水化析出的氢氧化钙的化学反应，使混凝土不仅提高早期强度，而且，后期强度也得到提高，28 d 强度可提高 10%～40%。

b．蒸压养护：混凝土在 100 ℃以上温度和几个大气压的蒸压釜中进行养护。

主要适用于硅酸盐混凝土拌和物及其制品，如灰－砂砖，石灰－粉煤灰砌块，石灰－粉煤灰加气混凝土等。由于在高温高压条件下，砂及粉煤灰等材料中的二氧化硅和三氧化二铝的溶解度和溶解速度大大提高，加速了与石灰的反应能力，使具有胶凝性质的水化产物迅速增加，因而制品强度增长较快。

（4）采用机械搅拌和振捣

混凝土采用机械搅拌，不仅比人工搅拌工效高，而且，搅拌得也均匀，故能提高混凝土的强度。

采用机械振捣的混合料，可使混凝土混合料的颗粒产生振动，暂时破坏水泥的凝聚结构，降低水泥浆的黏度和集料的摩擦力，使混凝土拌和物转入液体状态，提高流动性。因此，在满足施工和易性要求的条件下，可减少拌和用水量，降低水灰比。同时，混凝土混合物被振捣后，它的颗粒互相靠近，并把空气排出，使混凝土内部孔隙大大减少，从而使混凝土的密实度和强度大大提高。

二、硬化混凝土的变形性能

引起混凝土变形的因素很多，归纳起来有两类：非荷载作用下的变形与荷载作用下的变形。变形是混凝土的重要性质，它直接影响混凝土的强度和耐久性，特别对裂缝的产生有直接影响。

1．非荷载作用下的变形

（1）化学收缩

一般的硅酸盐类水泥水化生成物的体积比反应前物质的总体积要小，这就会导致水化过

程的体积收缩，这种收缩称为化学收缩。化学收缩是随混凝土龄期的延长而增加的，大致与时间的对数成正比，一般在混凝土成型后 40 多天内增长较快，以后就渐趋稳定。化学收缩是不能恢复的，它对结构物不会产生明显的破坏作用，但在混凝土中可产生微细裂缝。

（2）干湿变形

干湿变形取决于周围环境的湿度变化。混凝土在干燥空气中存放时，其内部吸附水分蒸发而引起凝胶体失水产生紧缩，以及毛细管内游离水分蒸发，毛细管内负压增大，也使混凝土产生收缩。如干缩后的混凝土再次吸水变湿后，一部分干缩变形是可以恢复的。

混凝土在水中硬化时，体积不变，甚至有轻微膨胀。这是由于凝胶体中胶体粒子的吸附水膜增厚，胶体粒子间距离增大所致。

混凝土的湿胀变形量很小，一般无破坏作用。但干缩变形对混凝土危害较大，干缩可能使混凝土表面出现拉应力而导致开裂，严重影响混凝土的耐久性。

影响混凝土干缩的因素有：水泥品种和细度、水泥用量和用水量等。火山灰质硅酸盐水泥比普通硅酸盐水泥干缩大。水泥越细，收缩也越大；水泥用量多，水灰比大，收缩也大。混凝土中砂石用量多，收缩小；砂石越干净，捣固越好，收缩也越小。在一般工程设计中，通常采用混凝土的线收缩率为（15～20）$\times 10^{-5}$，每米约收缩 0.15～0.2 mm。

（3）温度变形

混凝土与其它材料一样，也具有热胀冷缩的性质，这种热胀冷缩的变形，称为温度变形。混凝土温度膨胀系数约为 1×10^{-5}，即温度升高 1 ℃，每米约膨胀 0.01 mm。

温度变形对大体积混凝土极为不利。混凝土在硬化初期，水泥水化放出较多的热量，而混凝土是热的不良导体，散热很慢，使混凝土内部温度升高。但混凝土的外部温度则容易随气温下降，致使内外温差达 50～70 ℃，造成内部膨胀及外部收缩。这种内外变形的互相制约，使外部混凝土产生很大的拉应力，严重时就会使混凝土产生裂缝。因此，对大体积混凝土工程，应设法降低混凝土的发热量，如使用低热水泥，应减少水泥用量，采用人工降温，以及对表层混凝土加强保温保湿措施等，以减小内外温差，防止裂缝的产生和发展。

对纵长的混凝土及钢筋混凝土结构，应考虑混凝土温度变形所产生的危害，每隔一段长度应设置温度伸缩缝，以及在结构内配置温度钢筋。

2．荷载作用下的变形

（1）弹塑性变形和弹性模量

混凝土是一种弹塑性材料，在外力作用下，它既能产生可以恢复的弹性变形，又会产生不可恢复的塑性变形，见图 6－12。

在重复荷载作用下的应力－应变曲线，因作用力的大小不同而有不同的形式。当应力小于（0.3～0.5）f_{cu}时，每次卸荷都残留一部分塑性变形（ε_S），但随着重复次数的增加，塑性变形逐渐减少。若所施加的应力在（0.5～0.7）f_{cu}以上重复时，随着重复次数的增加，塑性变形逐渐增加，最后导致混凝土疲劳破坏。

弹性模量是反映应力与应变关系的物理量。混凝土是弹塑性体，随荷载的变化，应力与应变之间的比值也在变化，也就是说，混凝土的弹性模量不是定值。计算钢筋混凝土的变形、裂缝的开展及大体积混凝土的温度应力时，都需要知道混凝土的弹性模量。在混凝土结构或钢筋混凝土结构设计中，常采用一种按标准方法测得的静力受压弹性模量 E。测定静力受压弹性模量，是用棱柱体试件，在短期荷载试验下，当应力 $\sigma=0.4\,f_{cp}$，经重复加荷 4～5 次后，测得应力与应变 ε 的比值。

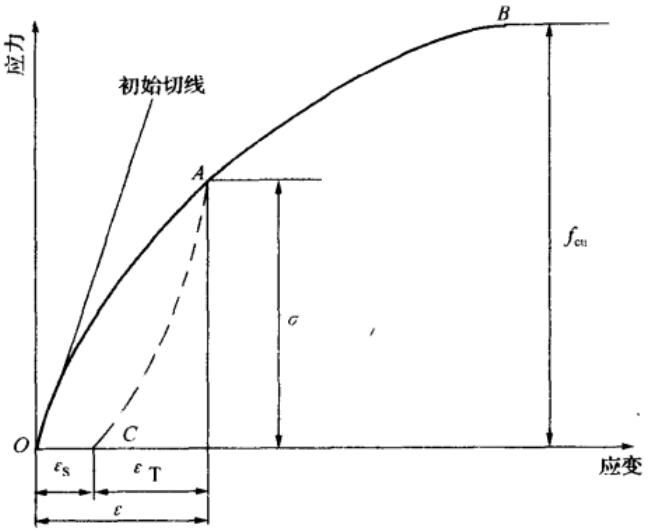


图 6－12　混凝土受压时的应力—应变曲线

$$E = \sigma/\varepsilon$$

式中　E——混凝土的静弹性模量；

σ——相当于 0.4 f_{cp}的应力；f_{cp}为轴心极限抗压强度；

ε——应变，相当于 0.4 f_{cp}的弹性变形。

混凝土的强度越高，弹性模量越高，两者存在一定的相关性。当混凝土的强度等级由 C10 增高到 C60 时，其弹性模量大致由 1.75×10^4 MPa 增至 3.60×10^4 MPa。

此外，混凝土的弹性模量还与材料的组成，各成分的比例及它们的弹性模量有关。水泥石的弹性模量一般低于集料的弹性模量，混凝土中集料含量较多，水灰比较小，养护较好及龄期较长时，混凝土的弹性模量就大。蒸气养护的弹性模量比标准养护的低。

（2）徐变

混凝土在恒定荷载长期作用下，随时间增长而沿受力方向增加的非弹性变形，称为混凝土的徐变。图 6－13 表示应变与加荷时间的关系。当混凝土开始加荷时产生瞬时变形，随着荷载持续作用时间的增长，就逐渐产生徐变变形。徐变变形初期增长较快，以后逐渐变慢，一般要延续 2～3 年才逐渐稳定下来。混凝土徐变变形量一般可达（3～5）$\times10^{-4}$，往往超过瞬时变形量的几倍，因此，徐变是不可忽视的。卸载后，混凝土立即以稍低于瞬时变形而恢复，称为瞬时恢复。其后还有一个随时间而减少的应变恢复，称为徐变恢复。最后残留下来不能恢复的变形，称为残余变形 。见图 6－13。

混凝土徐变的原因，一般认为徐变是由于水泥石中凝胶体在外力作用下，粘滞流变和凝胶粒子间的滑移而产生的变形，还与水泥石内部吸附水的迁移等有关。

影响混凝土徐变的因素很多，混凝土所受初应力越大，在混凝土制成后龄期较短时加荷，水灰比越大，水泥用量越多，都会使混凝土的徐变增大；另外，混凝土弹性模量大，会减小徐变，混凝土养护条件越好，水泥水化越充分，徐变也越小。

混凝土的徐变会使构件的变形增加，在钢筋混凝土截面中引起应力重新分布。对预应力钢筋混凝土结构，混凝土徐变将使钢筋的预应力受到损失。当钢筋与混凝土在结构中共同承受同一荷载时，混凝土的徐变会降低混凝土所承受的应力，而增大钢筋的应力。这些都对建

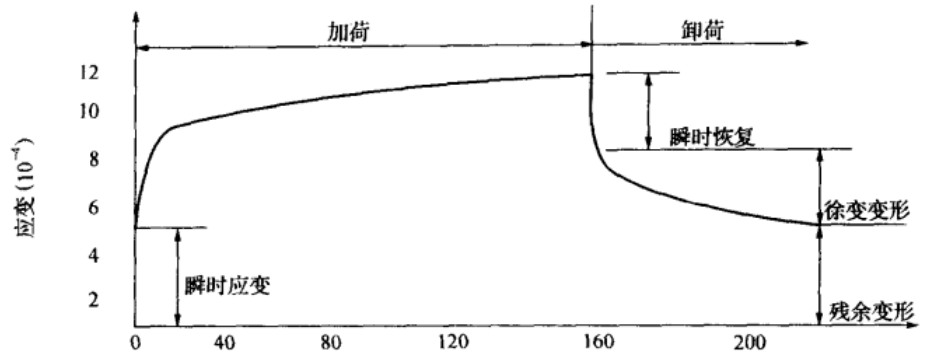


图 6-13 混凝土应变与加荷时间的关系（徐变）(d)

筑物产生不利的影响。徐变也有对工程有利的一面，如徐变可消除或减少钢筋混凝土内的应力集中，使应力较均匀地重新分布。对大体积混凝土，徐变能消除一部分由于温度变形所产生的破坏应力。

在实际工程中，混凝土往往都存在一些微裂缝，有些裂缝用肉眼能观察到，有些裂缝用肉眼观察不到。不同原因引起的裂缝具有不同的特征。有些裂缝是有害缝，也有一些裂缝是无害缝，这取决于结构物的性质、用途、所处的环境以及裂缝所处的部位和大小。一般来说有害缝为：

损害结构物功能。如水坝、水池、水塔等，因渗漏水而影响使用。

引起其它因素破坏。如钢筋锈蚀、水泥腐蚀等。

降低结构物刚度或影响结构物整体性。

损害表面功能。如造成表面缺陷，影响混凝土的外观等。

工程中应采取各种方法避免裂缝的产生，一旦出现有害缝，必须采取措施及时处理，确保结构物的安全及正常使用功能。

三、硬化混凝土的耐久性

建筑工程中要求混凝土不仅能安全地承受设计荷载，还应适应周围的自然环境，保证使用条件下的经久耐用。为此，要求混凝土必须有满足使用条件的耐久性指标，例如：抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性及抗碳化性等。

1．混凝土的抗渗性

混凝土的抗渗性，是指混凝土抵抗压力水渗透的能力。混凝土的抗渗性对于地下建筑、水工及港工建筑等工程，都有很重要的性能指标。抗渗性还直接影响混凝土的抗冻性及抗侵蚀性。

混凝土渗水的原因，是由于内部孔隙形成连通的渗水孔道。这些孔道主要来源于水泥浆中多余水分蒸发而留下的气孔，水泥浆泌水所产生的毛细孔道，内部的微裂缝以及施工振捣不密实产生的蜂窝、孔洞等。这些渗水通道，主要取决于混凝土的材料和成型质量。

混凝土的抗渗性，以抗渗等级表示。抗渗等级是以 28 d 龄期的标准抗渗试件，按规定方法试验，以不渗水时所能承受的最大水压来确定，并以代号 P 表示，如 P2、P4、P6、P8、P12 等不同的等级，它们分别表示能抵抗 0.2、0.4、0.6、0.8、1.2 MPa 的水压力而不渗透。

混凝土的抗渗性与水灰比有密切关系，还与水泥品种、集料级配、施工质量、养护条件，以及是否掺外加剂有关。

2. 混凝土的抗冻性

混凝土的抗冻性，是指混凝土在水饱和状态下，能经受多次冻融循环作用而不破坏，同时，强度也不严重降低的性能。在寒冷地区，尤其是经常与水接触，容易受冻的外部混凝土，应具有较高的抗冻性能，以提高混凝土的耐久性，延长建筑物的寿命。

影响混凝土抗冻性能的因素很多，主要是混凝土中空隙的大小、构造、数量及充水程度、环境的温湿度和经历冻融的次数。密实并具有封闭孔隙的混凝土，其抗冻性能往往较高。此外，水泥的品种和强度等级对混凝土的抗冻性也有影响。混凝土中掺入减水剂，可降低水灰比，提高混凝土密实度、强度和抗冻性；加入引气剂，可增加混凝土内部封闭孔隙，也能提高混凝土的抗冻性。

混凝土的抗冻性用抗冻等级表示，以 28 d 龄期的混凝土标准试件，在浸水饱和状态下，进行冻融循环试验，以同时满足强度损失率不超过 25%，质量损失率不超过 5%时的最大循环次数来表示。混凝土的抗冻等级有 F25、F50、F100、F150、F200、F250、F300 七个等级，它们分别表示混凝土能承受反复冻融循环次数为 25、50、100、150、200、250 和 300 次。

3. 混凝土的抗侵蚀性

当工程所处的环境有侵蚀介质时，对混凝土必须提出抗侵蚀性的要求。混凝土的抗侵蚀性取决于水泥品种、混凝土的密实度及孔隙特征。密实性好的，具有封闭孔隙的混凝土，侵蚀介质不易侵入，故抗侵蚀性好。水泥品种的选择应与工程所处环境条件相适应，可参照表 5－2 选用。

4. 混凝土的碳化

混凝土的碳化作用，是指空气中的二氧化碳与水泥石中的氢氧化钙作用，生成碳酸钙和水，使表层混凝土的碱度降低。

$$CO_2 + H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

碳化作用有对混凝土不利的影响，首先是减弱对钢筋的保护作用。由于水泥水化过程中生成大量氢氧化钙，使混凝土孔隙中充满饱和的氢氧化钙溶液，其 pH 值超过 12。钢筋在碱性介质中表面生成氧化膜，这层氧化膜使钢筋难以生锈。碳化作用降低了混凝土的碱度，当 pH 值低于 10 时，钢筋表面的氧化膜被破坏而开始生锈。其次，碳化作用还会引起混凝土的收缩，使混凝土表面碳化层产生拉应力，并可能产生微细裂缝，从而降低混凝土的抗折强度。

碳化作用对混凝土也有一些有利的影响，主要是碳化提高了碳化层的密实度和抗压强度。碳化作用对钢筋混凝土结构是害多利少。因此，工程实际中应设法提高混凝土的抗碳化能力。

影响混凝土碳化速度的主要因素有：

（1）水泥品种　掺混合材多的水泥，因其氢氧化钙含量较少，碳化速度要比掺混合材少的水泥更快。

（2）水灰比　水灰比大的混凝土，因孔隙较多，二氧化碳易于进入，碳化也快。

（3）环境湿度　在相对湿度为 50%～75%的环境时，碳化最快。相对湿度小于 25%或达到 100%时，碳化难以进行。因为碳化需要水分，而水分在不堵塞二氧化碳的通道时最容易产生碳化。此外，空气中二氧化碳浓度越高，碳化速度也越快。

（4）硬化条件　空气中或蒸气中养护的混凝土，比在潮湿环境或水中养护的混凝土碳化速度快。因为前者容易促使水泥石形成多孔结构或产生微裂缝；后者水化到一定程度后，混

凝土比较密实。

混凝土的碳化深度大体上与碳化时间的平方根成正比。为防止钢筋锈蚀，必须设置足够的混凝土保护层。

5. 碱-集料反应

水泥中 Na_2O 和 K_2O 含量多时，或混凝土中掺入的外加剂中含有过量强碱时，它们水解后生成的氢氧化钠和氢氧化钾等，能与集料中的活性二氧化硅反应，并在集料表面形成一层复杂的碱－硅酸凝胶。这种凝胶遇水时明显膨胀，使集料与水泥石界面胀裂，这种反应称为碱－集料反应。这种反应速度很慢，需几年或几十年，对混凝土的耐久性十分不利。

集料中含有活性二氧化硅的矿物有：蛋白石、玉髓、鳞石英等。含有活性氧化硅的岩石有：安山岩、凝灰岩、流纹岩等。用这种集料配混凝土时，必须用低碱水泥，控制水泥中碱含量（折算成 Na_2O）小于 0.6%，或采用掺混合材的水泥，以吸收钾钠离子，使反应生成物均匀分布于混凝土中。对有怀疑的集料，需做碱－集料试验，防止工程中混凝土出现碱－集料的破坏。对潮湿环境中使用的混凝土结构，每立方混凝土中的含碱量（以当量 Na_2O 计）不得超过 3.5 kg，对重要结构或含碱环境，不得超过 3.0%。

6. 提高混凝土耐久性的主要措施

以上所述，影响混凝土耐久性的各项指标虽不相同，但对提高混凝土耐久性的措施来说，却有很多共同之处。除原材料的选择外，混凝土的密实度是提高混凝土耐久性的一个重要环节。提高混凝土耐久性所采取的措施如下：

（1）合理选择水泥品种

水泥品种的选择应与工程所处环境条件相适应，可参照表 5－2 选用。

（2）控制混凝土的水灰比及水泥用量

水灰比的大小是决定混凝土密实性的主要因素，它不但影响混凝土的强度，而且，也严重影响其耐久性，工程实际中必须严格控制水灰比。

保证足够的水泥用量，同样可以起到提高混凝土密实性和耐久性的作用。《钢筋混凝土工程施工及验收规范》对建筑工程所用混凝土的最大水灰比及最小水泥用量做了规定。见表 6－6。

混凝土最大水灰比与最小用量的规定 **表 6－6**

环境条件		结构物类型	最大水灰比			最小水泥用量（kg）		
			素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土
干燥环境		普通地上建筑	不要求	0.65	0.60	200	260	300
潮湿环境	无冻害	室内高湿度环境 室外环境 非侵蚀水环境	0.70	0.60	0.60	225	280	300
	有冻害	室外受冻环境 室内高湿度受冻 非侵蚀水中受冻	0.55	0.55	0.55	250	280	300
有冻害和除冰剂的环境		有冻害和除冰剂的室内外环境	0.50	0.50	0.50	300	300	300

注：当用活性混合材取代部分水泥时，表中的最大水灰比与最小水泥用量以替代前的水泥计算；配制 C15 级以下的混凝土时，可不受本表限制。

(3) 选用较好的砂石集料

质量良好，技术条件合格的砂、石集料，是保证混凝土耐久性的重要条件。改善粗细集料级配，在允许的最大粒径范围内，尽量选用较大粒径的粗集料，可减小集料的空隙率和比表面积，也有助于提高混凝土的耐久性。

(4) 掺入引气剂或减水剂

掺入引气剂或减水剂对提高抗渗、抗冻等有良好的作用，在某些情况下，还能节约水泥，减少不耐久的成分。

(5) 改善混凝土的施工操作方法

混凝土施工中，应当搅拌均匀、浇灌和振捣密实，并加强养护，以保证混凝土的施工质量。

第五节　混凝土强度的检测评定

工程中必须对已形成的混凝土实体进行评定，但是，对于一批混凝土结构的强度，不可能采用全数的破坏性试验来检测和评定其强度。只能从检验批的总体中，随机抽取若干组试件，进行破坏性试验，并以试验结果来推断总体的质量状况。

为尽可能准确地反映混凝土的强度，要求一个验收批的混凝土，必须由强度等级相同、龄期相同，以及生产工艺条件和配合比基本相同的混凝土组成。制作试件的试样应在浇筑地点抽取，试件的抽取频率应符合有关标准或规范的要求，试件应以标准试件（150 mm 正方体）、按标准方法成型，在标准（温度 20±2 ℃，相对湿度 90% 以上）条件下养生，测得规定龄期（28 d）的抗压强度。当试件尺寸不标准时，可以乘以换算系数折算为标准强度。

根据我国规范规定，每组混凝土由三个试件组成。其强度代表值规定为：

1. 取三个试件强度的算术平均值，作为该组试件的强度代表值；

2. 当一组试件中强度最大值或最小值与中间值之差，超过中间值的 15% 时，取中间值作为该组试件的强度代表值；

3. 当一组试件中强度最大值和最小值与中间值之差，超过中间值的 15% 时，该组试件的强度不应作为评定的依据，此组试验作废。这可能是由于不规范的操作所导致的试件强度，不具备代表性。

根据所测得的多组混凝土强度的代表值组成一验收批，来进行混凝土强度的合格性判断。混凝土强度合格评定方法有三种。

一、标准差已知的统计方法

同一品种的混凝土生产，有可能在较长时间内，通过质量管理，维持基本相同的生产条件。包括维持原材料、设备、工艺以及人员配备的稳定性，即使有所变化，也能很快地予以调整而恢复正常。如预拌混凝土厂、预制混凝土构件厂和采用现场集中搅拌混凝土的施工单位，可采用统计方法来评定其混凝土的强度质量状况。因为这类生产状况下的每批混凝土强度变异性基本稳定，每批的强度标准差 σ_0 可按常数考虑，而且，其数值可以根据前一时期生产累计的强度数据，其生产周期不大于三个月，且不少于 15 个连续批的强度数据计算确定（σ_0）：

$$\sigma_0 = \frac{0.59}{m} \sum_{i=1}^{m} \Delta f_{cu,i}$$

式中　$f_{cu,i}$——前一检验期内第 i 验收批混凝土试件中强度最大值与最小值之差（MPa）；

m——前一检验期内验收批的总批数（m 不小于 15）。

对这类生产状况下，所检测得到的一批混凝土强度的代表值，应同时符合下列公式的要求。

$$mf_{cu} \geqslant f_{cu,k} + 0.7\sigma_0$$

$$f_{cu,min} \geqslant f_{cu,k} - 0.7\sigma_0$$

当混凝土强度等级不高于 C20 时，其强度最小值，应满足下式的要求：

$$f_{cu,min} \geqslant 0.85 f_{cu,k}$$

当混凝土强度等级高于 C20 时，其强度最小值，应满足下式的要求：

$$f_{cu,min} \geqslant 0.90 f_{cu,k}$$

式中 mf_{cu}——同一验收批混凝土强度的平均值 MPa；

$f_{cu,k}$——设计的混凝土强度标准值 MPa；

$f_{cu,min}$——同一验收批混凝土强度的最小值 MPa；

σ_0——混凝土强度标准差。

二、标准差未知的统计方法

当生产连续性较差，即在生产中无法维持基本相同的生产条件，或生产期较短，无法积累强度数据资料，以计算可靠的标准差参数时，检验评定条件中的强度标准差只能根据该验收批抽样的强度数据来直接确定。为了保证所检验数据具有代表性，要求每批组数不少于 10 组。其强度代表值应同时满足下列公式的要求。

$$mf_{cu} - \lambda_1 sf_{cu} \geqslant 0.9 f_{cu,k}$$

$$f_{cu,min} \geqslant \lambda_2 f_{cu,k}$$

式中 λ_1、λ_2—— 合格判定系数，按下表选用。

混凝土强度的合格判定系数 表 6-7

n	10~14	15~24	≥25
λ_1	1.7	1.65	1.65
λ_2	0.9	0.85	

Sf_{cu}——验收批混凝土强度的标准差（MPa）；当计算值小于 $0.06f_{cu,k}$ 时，取 $Sf_{cu} = 0.06f_{cu,k}$。验收批混凝土强度标准差 Sf_{cu} 按下式计算：

$$Sf_{cu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_{cu,i}^2 - nmf_{cu}^2}{n-1}}$$

式中 $f_{cu,i}$——验收批第 i 组混凝土试件强度代表值（MPa）；

n——验收批混凝土试件的总组数。

三、非统计方法

当前我国各地相当普遍地存在着小批量零星混凝土的生产方式，其试件组数有限，不具备按统计方法评定混凝土强度的条件，此时，可采用非统计方法评定强度。

当一个验收批的试件组数 $n=2\sim9$ 组时，混凝土强度满足设计要求的条件是其试验强度代表值均应满足如下公式。

$$m_{f_{cu}} \geqslant 1.15 f_{cu,k} \quad f_{cu,min} \geqslant 0.95 f_{cu,k}$$

当一个验收批的混凝土试件仅有一组时，则该组试件强度应不低于强度标准值115%。

四、混凝土强度的合格性判定

当检验批混凝土强度能满足上述三种方法之一的要求时，则该批混凝土强度判为合格（即满足设计要求）；当不能满足上述规定时，该批混凝土强度判为不合格。

对于评定为不合格的混凝土结构或构件，应进行实体鉴定，经鉴定仍未达到设计要求的结构或构件必须及时处理，确保结构强度满足设计要求。

当对混凝土试件强度的代表性有怀疑时，可采用从结构或构件中钻取试件的方法或采用非破损（回弹、超声）检验方法，按有关标准的规定对结构或构件中混凝土的强度进行评定。

工程实际中，经常在早期需要检验结构或构件能否承受拆模、出池、出厂、吊装、预应力钢筋张拉或放张，或施工期间的短暂负荷，此时，必须了解混凝土结构的实体强度，这时应制作同条件养生试件，并以此试件的强度来估计混凝土的实体强度。其中同条件养生，即试件的成型方法和养护条件，应与施工现场采用的成型方法和养护条件相同。

第六节　混凝土的配合比设计

混凝土配合比，是指混凝土中各组成材料之间的比例关系。混凝土配合比，通常以1 m^3混凝土中各种材料的用量来表示，或以各种材料用料量的比例表示（以水泥质量为1）。工程中通常以每搅拌一盘混凝土的各种材料用量表示。

一、混凝土配合比设计的基本要求

1．满足结构设计和质量验收规范规定的强度要求。

2．满足现场施工条件所要求的和易性。

3．满足工程所处环境和设计规定的耐久性要求。

4．在满足上述要求的前提下，尽量减少高价材料（水泥）的用量，降低混凝土的成本，以便取得较好的经济效果。

二、混凝土配比设计的三个参数

普通混凝土四种主要组成材料的相对比例，通常由三个参数来控制。

1．水灰比

混凝土中水与水泥的比例称为水灰比。如前所述，水灰比对混凝土和易性、强度和耐久性都具有重要的影响，因此，通常是根据强度和耐久性来确定水灰比的大小。一方面，水灰比较小时可以使强度更高且耐久性更好；另一方面，在保证混凝土和易性所要求用水量基本不变的情况下，只要满足强度和耐久性对水灰比的要求，选用较大水灰比时，可以节约水泥。

2．砂率

砂子占砂石总量的百分率称为砂率。砂率对混合料的和易性影响较大，若选择不恰当，还会对混凝土强度和耐久性产生影响。砂率的选用应该合理，在保证和易性要求的条件下，宜取较小值，以利于节约水泥。

3．用水量

用水量是指1 m^3混凝土拌和物中水的用量（kg/m^3）。在水灰比确定后，混凝土中单位用水量也表示水泥浆与集料之间的比例关系。为节约水泥和改善耐久性，在满足流动性条件

下，应尽可能取较小的单位用水量。

三、混凝土配合比设计的基本原理

1．绝对体积法

该法是假定混凝土拌和物的体积等于各组成材料绝对体积与混凝土拌和物中所含空气体积之和。

2．假定表观密度法（假定容重法）

如果原材料比较稳定，可先假设混凝土的表观密度为一定值，混凝土拌和物各组成材料的单位用量之和，即为其表观密度。通常普通混凝土的表观密度为2 350～2 450 kg/m^3。

3．查表法

它是根据大量试验结果进行整理，将各种配比列成表，使用时根据相应条件查表，选取适当的配比。因为它是直接从工程实际中总结的结果，比较实用，所以在工程中应用较广泛。

四、混凝土配合比设计的步骤

1．设计的基本资料

（1）设计要求的混凝土强度等级，承担施工单位的管理水平；

（2）工程所处的环境和设计对混凝土耐久性的要求；

（3）原材料品种及其物理力学性能指标；

（4）混凝土所处的部位、结构构造情况、施工条件等。

2．初步配合比计算

（1）试配强度确定 $f_{cu,o}$

$$f_{cu,o} = f_{cu,k} - t\sigma$$

式中 $f_{cu,o}$——混凝土的配制强度；

$f_{cu,k}$——设计要求的混凝土强度等级；

σ——混凝土强度标准差（根据施工单位管理水平或参照下表6－8选用）；

t——置信度界限，决定保证率 P 的积分下限。现行规范对一般工程中混凝土要求强度保证率 $P \geqslant 95\%$，对应的 $t = -1.645$，上式应写为：

$$f_{cu,o} = f_{cu,k} + 1.645\sigma$$

标准差 σ 值参考表 **表6－8**

强度等级（MPa）	低于C20	C20～C35	高于C35
标准差 σ（MPa）	4.0	5.0	6.0

（2）计算水灰比

将已确定的各参数代入混凝土强度公式

$$f_{cu,o} = \alpha_a f_{ce} \times (C/W - \alpha_b)$$

由此计算水灰比 W/C。

根据上式计算所得的水灰比只能满足强度要求，还应对此数据校核以满足耐久性的要求。表6－6是施工规范，根据耐久性要求对混凝土的最大水灰比和最小水泥用量的限制规定。为同时满足强度和耐久性的要求，应在计算的水灰比与查表6－6的水灰比中，选用其

中较小值。

(3) 选定单位用水量（m_{wo}）

用水量直接决定了混凝土的和易性，工程中应根据施工要求的坍落度，参考表 6－5 和集料品种规格，参考表 6－9 选用。

混凝土用水量参考表（kg/m^3） **表 6－9**

项　目	指　标	卵石最大粒径（mm）			碎石最大粒径（mm）		
坍落度（mm）	70～90	215	195	175	230	215	195
	50～70	210	190	170	220	205	185
	30～50	200	180	160	210	195	175
	10～30	190	170	150	200	185	165
维勃稠度（s）	5～10	185	175	155	190	180	165
	10～15	180	165	150	185	175	160
	15～20	175	160	145	180	170	155

(4) 计算水泥用量

根据已确定的 W/C 和 m_{wo}，可求出 1 m^3 混凝土中水泥用量 m_{co}：

$$m_{co} = m_{wo}/(W/C)$$

为保证混凝土的耐久性，由上式得出的水泥用量还应满足表 6－6 规定的最小水泥用量。若计算所得的水泥用量小于表 6－6 规定值，应取规定的最小水泥用量值。

(5) 选择合理的砂率值（S）

合理砂率可通过试验、计算或查表求得。

试验是通过变化砂率测混合物坍落度，能获得最大流动度的砂率为最佳砂率；或选取在相同的坍落度下，变化砂率和水泥浆用量，获得最节省水泥的砂率。计算法是根据砂填充石子空隙，并稍有富余，以砂石的物理参数计算出来。

也可根据集料种类、规格及混凝土的水灰比，参考表 6－10 选用。

混凝土砂率取值参考表（%） **表 6－10**

水灰比 W/C	卵石最大粒径（mm）			碎石最大粒径（mm）		
	10	20	40	16	20	40
0.40	26～32	25～31	24～30	30～35	29～34	27～32
0.50	30～35	29～34	28～33	33～38	32～37	30～35
0.60	33～38	32～37	31～36	36～41	35～40	33～38
0.70	36～41	35～40	34～39	39～44	38～43	36～41

砂率 β_s 的计算方法，是根据单位堆积体积粗集料的空隙等于所需砂的堆积体积，且在此基础上增加部分砂量，使多余的砂子起拨开粗集料的作用，从而改善新拌混凝土的流动性。其计算公式为：

$$\beta_s = \frac{\alpha \cdot P \cdot \rho_{os}}{P \cdot \rho_{os} + \rho_{og}}$$

式中 ρ_{os}——砂子的堆积密度（kg/m^3）；

ρ_{og}——粗集料的堆积密度（kg/m^3）；

P——粗集料的空隙率（%）；

α——砂子的拨开系数，通常为15%～25%。

（6）计算粗细、集料用量（m_{go}、m_{so}）

粗细集料用量可用重量法或体积法计算。

a. 重量法（假定表观密度法）应按下式计算：

$$m_{co} + m_{go} + m_{so} + m_{wo} = m_{cp}$$

$$\beta_s = m_{so}/(m_{so} + m_{go}) \times 100\%$$

式中 m_{co}——每立方米混凝土的水泥用量（kg）；

m_{go}——每立方米混凝土的粗集料用量（kg）；

m_{so}——每立方米混凝土的细集料用量（kg）；

m_{wo}——每立方米混凝土的用水量（kg）；

β_s——砂率（%）

m_{cp}——每立方米混凝土拌和物的假定重量（kg）；其值可取2 400～2 450。

b. 当采用体积法（绝对体积法）时，应按下式计算：

$$m_{co}/\rho_c + m_{go}/\rho_g + m_{so}/\rho_s + m_{wo}/\rho_w + 0.01\alpha = 1$$

$$\beta_s = m_{so}/(m_{so} + m_{go}) \times 100\%$$

式中 ρ_c——水泥密度（kg/m^3），可取2 900～3 100；

ρ_g——粗集料的表观密度（kg/m^3）；

ρ_s——细集料的表观密度（kg/m^3）；

ρ_w——水的密度（kg/m^3），可取1 000；

α——混凝土的含气量百分数，在不使用引气型外加剂时，α可取为1。

通过以上计算，得出每立方米混凝土各种材料用量，即初步配合比计算完成。

3. 配合比的调整

通过计算求得的各项材料用量（初步配合比），是利用图表和经验公式初步估算出来的，与实际情况会有出入，因而，必须进行试验加以检验，并进行必要的调整。

（1）调整和易性，确定基准配合比

按初步计算配合比称取材料进行试拌。混凝土拌和物搅拌均匀后测坍落度，并检查其粘聚性和保水性能的好坏。如实测坍落度低于设计要求，可保持水灰比不变，增加适量水泥浆；如坍落度太大，可保持砂率不变，增加适量集料；如出现粘聚性和保水性不良，可适当提高砂率；反之应减小砂率。每次调整后再试拌，直到符合要求为止。当试拌工作完成后，记录好各种材料调整后用量，并测定混凝土拌和物的实际表观密度（ρ_c），满足和易性的配比为基准配合比。

（2）检验强度和耐久性，确定试验室配合比

基准配合比能否满足强度要求，需进行强度检验。一般采用三个不同的配合比，其中一个为基准配合比，另外两个配合比的水灰比值，应较基准配合比分别增加或减少0.05，其用水量应该与基准配合比相同，但砂率值可做适当调整。各种配比制作两组强度试块，如有

耐久性要求，应同时制作有关耐久性测试指标的试件，标准养生 28 d 进行强度测定。（在制作混凝土试块时，要检验拌和物的和易性，并测定表观密度，并以此结果，作为代表这一配合比的混凝土拌和物的性能。）

通过测定强度和耐久性指标，选出既满足要求，水泥用量又少的配合比，作为所需的配合比。也可根据各水灰比所得强度，用做图法或计算法（直线关系）求出配制强度应采用的水灰比，再根据实测混凝土的表观密度（$\rho_{c,t}$）做必要的校正。试验室配比各种材料用量按下式计算：

$$\delta = \rho_{c,t}/(m_{cb} + m_{sb} + m_{gb} + m_{wb})$$

$$m_c = m_{cb} \cdot \delta$$

$$m_s = m_{sb} \cdot \delta$$

$$m_g = m_{gb} \cdot \delta$$

$$m_w = m_{wb} \cdot \delta$$

式中 $\rho_{c,t}$——混凝土表观密度实测值（kg/m^3）；

m_{cb}、m_{sb}、m_{gb}、m_{wb}——依次为拌和混凝土时所用水泥、砂、石和水的质量（kg/m^3）；

m_c、m_s、m_g、m_w——依次为试验室配比每立方米混凝土中水泥、砂、石、水的用量。

（3）换算施工配合比

混凝土试配时，应采用工程中实际使用的原材料。在施工过程中，如工地原材料含水量与试配时含水量有变化（如下雨后等），则应根据实际含水量对配比加以调整。

如工地测出砂的含水率比试配时含水率大 $a\%$，石子含水率比试配时大 $b\%$，则上述试验室配比换算成工地配比，应按以下公式计算。

$$m'_c = m_c$$

$$m'_s = m_s \cdot (1 + a\%)$$

$$m'_g = m_g \cdot (1 + b\%)$$

$$m'_w = m_w - m_s \cdot a\% - m_g \cdot b\%$$

式中 m'_c、m'_s、m'_g、m'_w——依次为工地每立方米混凝土中水泥、砂、石和水的用量。

五、混凝土配合比设计实例

某教学楼现浇钢筋混凝土柱，混凝土柱截面最小尺寸为 300 mm，钢筋间净距最小尺寸为 60 mm。该柱在露天受雨雪影响。混凝土设计等级为 C20。采用 32.5 级普通硅酸盐水泥，密度为 $3.1 g/cm^3$；砂子为中砂，表观密度 $2.65 g/cm^3$，堆密度为 $1\,500 kg/m^3$；石子为碎石，表观密度 $2.70 g/cm^3$，堆密度为 $1\,550 kg/m^3$。混凝土施工采用机械搅拌、机械振捣，施工单位无混凝土强度标准差的历史统计资料。

根据以上条件，求混凝土试验室配合比。

解：1. 初步配合比计算

（1）确定试配强度（$f_{cu,o}$）

$$f_{cu,o} = f_{cu,k} + t\sigma_0$$

由于施工单位没有 σ_0 统计资料，查表 6-8，$\sigma_0 = 4$，当保证率 = 95% 时，$t = -1.645$，代入：

$$f_{cu,o} = 20 + 1.645 \times 5 = 28.2(MPa)$$

（2）确定水灰比（W/C）

$$W/C = \alpha_a f_{ce}/(f_{cu,o} + \alpha_a \alpha_b f_{ce})$$

采用碎石，$\alpha_a = 0.46$；$\alpha_b = 0.07$。

实测 $f_{ce} = 38.9$ MPa，代入上式，

$$\frac{W}{C} = \frac{0.46 \times 38.9}{28.2 + 0.46 \times 0.07 \times 51.3} = 0.6$$

根据表 6－6 耐久性要求 W/C 不得大于 0.65，取 $W/C = 0.6$。

（3）确定单位用水量（m_{wo}）

确定粗集料最大粒径：根据规范，粗集料最大粒径不超过结构截面最小尺寸的 1/4，并不得大于钢筋间最小净距的 3/4。

$$D_{max} \leqslant (1/4) \times 300 = 75(\text{mm})$$

同时

$$D_{max} \leqslant (1/4) \times 60 = 45(\text{mm})$$

因此，粗集料最大粒径按公称粒级应选用 $D_{max} = 40$ mm。即采用 5～40 mm 的碎石集料。

确定施工的坍落度：查表 6－5，本结构种类为中型截面柱子，坍落度为 30～50 mm。

确定单位用水量：查表 6－9，选用 $m_w = 180$ kg/m^3。

（4）计算水泥用量

$$m_c = m_w/(W/C) = 180/0.6 = 300 \text{ kg/m}^3$$

对照表 6－6，本工程要求最小水泥用量为 250 kg/m^3，故选水泥用量 m_c 为 300 kg/m^3。

（5）确定砂率（β_s）

查表 6－10，砂率范围为 $\beta_s = 33 \sim 38\%$；

采用砂率公式计算，

$$\beta_s = \rho_{os} \times P/(\rho_{os} \times P + \rho_{og}) \times a = 1.5 \times 0.43/(1.5 \times 0.43 + 1.55) \times 1.2 = 35\%$$

式中 a——富余系数，取为 1.2；

P——石子空隙率；

ρ_{os}、ρ_{og}——为砂、石表观密度。

根据查表或计算取 $\beta_s = 35\%$。

（6）计算砂石用量（采用体积法）

$300/3\,100 + 180/1\,000 + m_s/2\,650 + m_g/2\,700 + 0.01 \times 1 = 1$（m^3）

$0.35 = m_g/(m_s + m_g) \times 100\%$

解方程组得：

$$m_s = 685 \text{ kg/m}^2 \qquad m_g = 1\,268 \text{ kg/m}^2$$

经初步计算，每立方米混凝土材料用量为：水泥 300 kg；水 180 kg；砂 685 kg；石子 1 268 kg。

2．配合比的调整

（1）和易性的调整

按初步配比，称取 12 升混凝土的材料用量，水泥为 3.72 kg，水 2.16 kg，砂8.18 kg，石子 15.16 kg。按规定方法拌和，测得坍落度为 10 mm，达不到规定坍落度 30～50 mm，增加水泥和水各 5%，即水泥用量为 3.91 kg，水为 2.27 kg，经拌和测得坍落度为 35 mm，混合物粘聚性、保水性均良好。经调整后的各项材料用量：水泥 3.91 kg，水 2.27 kg，砂

8.18 kg，石子 15.16 kg，材料总量为 29.52 kg。

（2）强度校核

采用水灰比为 0.53、0.58 和 0.63 三个不同的配合比，配制三组混凝土试件，并检验和易性（因 $W/C=0.58$ 的基准配合比已检验，可不再检验），测混凝土混合物表观密度，分别制作混凝土试块，标养 28 天，然后测强度，其结果如下表：

水灰比	混凝土配合比（kg）				坍落度	表观密度	强度
	水泥	砂	石	水			
0.55	6.5	13.7	35.36	3.6	30	2 460	32.2
0.60	6.0	13.7	35.36	3.6	35	2 455	28.7
0.65	5.5	13.7	35.36	3.6	42	2 450	25.8

根据试验结果，选水灰比为 0.60 的基准配比为试验室配比。按实测表观密度校核：

$$\delta = 2\,455/(6+13.7+25.36+3.6) = 50.4$$

$$m_c = 6.0 \times 50.4 = 302\ (\text{kg})$$

$$m_s = 13.7 \times 50.4 = 690.5\ (\text{kg})$$

$$m_g = 25.36 \times 50.4 = 1\,278\ (\text{kg})$$

$$m_w = 3.6 \times 50.4 = 181.4\ (\text{kg})$$

即确定的混凝土设计配合比为：

水泥 302 kg、砂 690.5 kg、石 1 278 kg、水 181.4 kg。

第七节　混凝土外加剂

混凝土外加剂是在混凝土拌和过程中掺入，并能按要求改善混凝土性能的材料，一般情况下，外加剂掺量不超过水泥质量的 5%。

混凝土中掺入外加剂，是行之有效的改善混凝土性能的措施。随着科学技术的不断进步，外加剂已越来越多地得到应用，尤其是近二十多年来发展较快，新的品种不断出现，外加剂已成为混凝土除四种基本材料以外的第五种重要组分。

一、混凝土外加剂的分类

1．按化学成分可分成三类：

（1）无机化合物，多为电解质盐类。

（2）有机化合物，多为表面活性剂。

（3）有机无机复合物。

2．按功能分为四类：

（1）改善混凝土拌和物流变性能的外加剂。如各种减水剂、泵送剂、保水剂等。

（2）调节混凝土凝结时间，硬化性能的外加强剂。如缓凝剂、早强剂、速凝剂等。

（3）改善混凝土耐久性能的外加剂。如加气剂、防水剂和阻锈剂等。

（4）改善混凝土其它性能的外加剂。如加气剂、膨胀剂、防冻剂、着色剂、防水剂、碱-骨料反应抑制剂、隔离剂、养生剂等。

二、常用混凝土外加剂

1. 减水剂

减水剂是指在混凝土坍落度基本相同的条件下，能减少拌和用水量的外加剂。根据减水剂的作用效果及功能情况，减水剂可分为普通减水剂、高效减水剂、早强减水剂、缓凝减水剂、引气减水剂等。

（1）减水剂的作用机理

减水剂多属于表面活性剂，它的分子结构是由亲水基团和憎水基团组成的，当两种物质接触时（如水-水泥，水-油，水-气），表面活性剂的亲水基团朝向水，憎水基团朝向水泥颗粒（油或气），大多数表面活性剂的亲水基团在水溶液中能电离成离子，带有同种电荷（不能电离成离子的也具有一定极性），在电性斥力作用下，互相排斥，具有分散、湿润、润滑、乳化、起泡等作用效果。

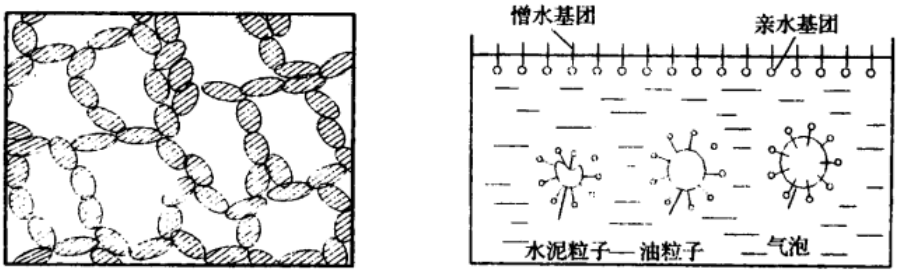


图 6-14　减水剂作用机理示意图

在未加减水剂的水泥浆中，由于以下原因，水泥浆会形成一种絮凝结构。其原因有：

a. 水泥矿物在水化过程中带有异性电荷；

b. 水泥颗粒在溶液中的热运动，在某些边棱角处互相碰撞；

c. 水泥矿物水化后的溶剂化水膜，产生某些缔合作用；

d. 水泥颗粒间的引力。

上述原因使水泥颗粒间相互聚集，因而形成絮凝结构，并包裹一些游离水，使水泥与水的接触面减小，浆体显得干稠。

如果在水泥浆体中加入一定量减水剂，减水剂的定向吸附，在电性斥力作用下具有分散效应，使絮凝结构解体，释放出游离水，提高水泥浆的流动度；通常减水剂的亲水基极性很强，很容易与水分子中氢键产生缔合，再加上水分子间氢键缔合，使水泥颗粒表面形成一层稳定的溶剂化水膜，在水泥颗粒间起润滑作用。同时，有些减水剂也能引入一定量气泡，在水泥浆体中如同滚珠，也起到润滑作用；水泥颗粒外包水膜，增加水泥与水的接触面积，使水泥颗粒润湿水化充分，有利于强度的提高。

减水剂本身不与水泥起化学反应，也不改变水化产物，但它可以改善混凝土的性状，使水泥的水化过程和内部结构发生变化，从而显著地影响或改善混凝土的一系列物理力学性能。

（2）减水剂的经济技术效果

掺减水剂的混凝土与未掺减水剂基准混凝土相比，具有如下效果：

a. 在保证混凝土混合物和易性和水泥用量不变的条件下，可减少用水量，降低水灰比，从而提高混凝土的强度和耐久性。

b. 在保持混凝土强度（水灰比不变）和坍落度不变的情况下，可节约水泥用量。

c. 在保持水灰比与水泥用量不变的情况下，可提高混凝土混合物的流动性，从而可满足水下浇筑、大模板或泵送混凝土的施工工艺要求。

d. 在拌和物中加入减水剂后，可减少拌和物的泌水离析现象；延缓拌和物的凝结时间；降低水泥水化放热速度；显著地提高混凝土的抗渗性及抗冻性，改善耐久性能。

（3）减水剂的种类：

根据减水或增塑效果可分为普通减水剂与高效减水剂。普通减水剂是指在混凝土坍落度基本相同的情况下，掺加适量减水剂能减少拌和水量不超过10%的减水剂。

a. 普通减水剂有木质素磺酸纳类、糖钙类等，它们适合于对增塑幅度不太高的混凝土工程。

b. 高效减水剂有萘磺酸盐类、蜜胺树脂类，氨基苯磺酸盐类、磺化古玛隆树脂、丙烯酸树脂类等，它们适合于大幅度减水或增塑的混凝土，是在高性能混凝土中必不可少的原材料。它们的减水率多在15%～30%之间，有时多种减水剂复合使用还可能具有更好的效果。

2. 早强剂及早强减水剂

早强剂是指加速混凝土早期强度发展的外加剂称谓早强剂。它是通过改变水泥的水化过程或速度加快强度的发展。常用早强剂有以下几种：

（1）氯化钙（氯化钠）早强剂

氯化钙的早强作用是它能与C_3A和$Ca(OH)_2$反应，生成不溶性复盐水化氯铝酸钙和氧氯酸钙，增加水泥浆体中固相比例，提高早期强度；同时液相中$Ca(OH)_2$浓度降低，也会促使C_3S，C_2S加速水化，使早期强度提高。

氯化钙的适宜掺量为1%～2%，可使2～3 d强度提高40%～100%，7 d强度提高25%。混凝土中掺入氯化钙，增加了溶液中等氯离子，氯离子会促进钢筋锈蚀，因而在钢筋混凝土中掺量不得超过水泥用量1%，必要时应与阻锈剂亚硝酸钠$NaNO_2$复合使用。素混凝土中氯盐掺量不得大于3%。

（2）硫酸盐类（硫酸钠、硫酸钙、硫代硫酸钠）

硫酸盐的早强作用主要是与水泥的水化产物$Ca(OH)_2$反应，生成高分散性的化学石膏，它与C_3A的化学反应比外掺石膏的作用快得多，能迅速生成水化硫铝酸钙，增加固相体积，提高早期结构的密实度，同时也会加快水泥的水化速度，因而提高混凝土的早期强度。硫酸钠的适宜掺量为0.5%～2%，以复合使用效果更佳。使用时提防引起碱-集料反应。

（3）有机胺类（三乙醇胺，三乙丙醇胺）

三乙醇胺是一种非离子型表面活性剂，它不改变水化生成物，但能在水泥的水化过程中起着“催化作用”，与其它早强剂复合效果更好。

（4）其它：如甲酸盐等

有些减水剂具有早强效果，也有些早强减水剂是由早强剂和减水剂复合而成。

3. 引气剂与引气减水剂

引气剂是指在搅拌混凝土过程中，能引入大量均匀分布、稳定而封闭的微小气泡的外加剂。引气剂也是表面活性剂，憎水基团朝向气泡，亲水基团吸附一层水膜，由于引气剂离子对液膜的保护作用，使气泡不易破裂。引入的这些微小气泡（直径为0.01～2 mm）在拌和物中均匀分布，明显地改善混合料的和易性，提高混凝土的耐久性、抗冻性和抗渗性，使混

凝土的强度和弹性模量有所降低。

常用的引气剂有松香热聚物、松香皂、烷基苯磺酸盐类、脂肪醇磺酸盐类等。适宜掺量为水泥质量的1‰左右。

引气剂与引气减水剂可用于抗冻混凝土、防渗混凝土、抗硫酸盐混凝土、泌水严重的混凝土、贫混凝土、轻集料混凝土，以及对饰面有要求的混凝土。不宜用于蒸养混凝土和预应力混凝土。

4. 缓凝剂及缓凝减水剂

缓凝剂是指能延长混凝土凝结时间的外加剂。

由于缓凝剂在水泥及其水化物表面上的吸附作用，或与水泥反应生成不溶层而达到缓凝的效果。缓凝剂同时还具有减水，增强，降低水化热等多种功能，适用于大体积混凝土工程，高温季节施工的混凝土工程和需长时间停放或远距离运输的混凝土，如泵送或滑模施工的工程。

常用的缓凝剂及缓凝减水剂有以下几种：

(1) 糖类：如糖钙等，掺量为水泥的0.1%～0.3%；

(2) 木质素磺酸盐类：如木质素磺酸钙（钠）等；掺量为水泥的0.2%～0.3%；

(3) 羟基羧酸及其盐类：如柠檬酸，酒石酸钾钠等；掺量为水泥的0.03%～0.1%；

(4) 无机盐类：如锌盐、硼酸盐、磷酸盐等；掺量为水泥的0.1%～0.2%；

(5) 其它：如胺盐及其衍生物、纤维素醚等。

5. 防冻剂

防冻剂是指能降低水泥混凝土拌和物液相冰点，使混凝土在相应负温下免受冻害，并在规定养护条件下达到预期性能的外加剂。常用的防冻剂有：

(1) 氯盐类：以氯盐及其它早强剂、减水剂、引气剂复合的外加剂；

(2) 氯盐阻锈类：氯盐与阻锈剂（亚硝酸钠）为主复合的外加剂；

(3) 无氯盐类：以亚硝酸盐、硝酸盐、碳酸盐、乙酸钠或尿素为主复合的外加剂。

近年来也研制有机与无机复合的防冻剂并收到一定的效果。值得注意的是，有些早强剂易形成挥发氨或在混凝土表面形成絮状结晶物，这些都必须控制，凡较严重的不得使用。

第八节　特种混凝土

土木建筑工程中，除了使用普通水泥混凝土外，为满足工程的特殊用途，采用新型材料、充分利用废料或采用新的工艺，在某些工程中经常使用特种水泥混凝土。常用的特种混凝土，有轻集料水泥混凝土、粉煤灰水泥混凝土、防水混凝土、纤维水泥混凝土、碾压混凝土、聚合物水泥混凝土等，这里仅介绍水泥粉煤灰混凝土、防水混凝土、轻集料水泥混凝土等。

一、水泥粉煤灰混凝土

水泥粉煤灰混凝土是指在水泥混凝土中掺加粉煤灰组分制成的混凝土。混凝土中掺入粉煤灰后，使其多种性能得以改善，并具有明显的经济效益。粉煤灰作为一个组分对混凝土性能的影响较大，工程实际中应对配合比设计作相应调整，对粉煤灰也有相应的要求。

1. 对粉煤灰品质指标的要求

只有满足相应技术指标的粉煤灰，方可用于混凝土。一般混凝土对粉煤灰的品质指标要求有烧失量、细度、SO_3 含量、需水量比等。根据这些指标，粉煤灰可分为三个等级，不同

等级的粉煤灰指标要求见表 6－11。

各等级粉煤灰品质指标要求（%） **表 6－11**

粉煤灰等级	品质指标			
	烧失量	细度	需水量比	SO_3 含量
Ⅰ级	≤5%	≤12%	≤95%	≤3%
Ⅱ级	≤8%	≤20%	≤105%	≤3%
Ⅲ级	≤15%	≤45%	≤115%	≤3%

注：表中烧失量是指在 950～1 000℃下，灼烧 15～20 min 至恒重时的质量损失；
细度是 45 μm 方孔筛的筛余量；需水量比是指相同流动度下，掺 30% 粉煤灰与未掺粉煤灰的硅酸盐水泥胶砂需水量之比。

不同等级粉煤灰在混凝土中的应用范围不同，一般要求：

（1）Ⅰ级粉煤灰配制的水泥混凝土可应用于各种混凝土、钢筋混凝土和跨度小于 6 m 的预应力混凝土结构。

（2）Ⅱ级粉煤灰配制的水泥混凝土可用于素混凝土或普通钢筋混凝土结构。

（3）Ⅲ级粉煤灰配制的水泥混凝土可用于 C30 以下的素混凝土结构。

2．粉煤灰对水泥混凝土的性能改善

（1）粉煤灰对混凝土性能改善的机理

a．形态效应：粉煤灰中的多数颗粒是表面光滑、致密、细粒、海绵状的硅铝酸盐玻璃微珠，其级配好，堆积体的比表面积小。当粉煤灰颗粒填充于水泥浆体中颗粒间的空隙后，能使水泥浆的密实度明显提高，硬化后水泥浆体的干缩明显减少，可改善水泥混凝土的抗裂性。

b．活性效应：粉煤灰中存在大量的活性 SiO_2 和 Al_2O_3，这些活性成分在有水的情况下能与石灰、水泥水化产生的 $Ca(OH)_2$ 反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，降低了水泥水化产物的浓度。这对加快水泥的水化和尽早充分利用水泥的胶凝性具有明显的促进作用。上述反应多在水泥浆体的孔隙中进行，因此，显著降低了混凝土内部结构中水泥石的孔隙率，也改善了孔结构（连通孔、大孔减少），提高了混凝土的密实性。

c．微集料效应：光滑的球状粉煤灰微粒均匀地分布于水泥浆中水泥颗粒之间时，一方面有效地阻止了水泥颗粒间的相互粘结，改善了水泥浆的流动性；另一方面，粉煤灰颗粒在水泥颗粒间的隔离作用使水分易于渗入，促进了水泥-粉煤灰体系内的水化反应速度。因此，粉煤灰的微集料效应，既改善了混凝土的和易性，又促进了混凝土中水泥的水化反应。

（2）粉煤灰对混凝土性能的改善作用

a．改善混凝土的和易性；

b．提高混凝土的强度，特别是后期强度；

c．降低单位体积混凝土内的水化热；

d．减少混凝土的收缩，主要是减少干燥收缩；

e．显著改善混凝土的耐久性，特别是改善混凝土的抗渗性、抗腐蚀性，抑止混凝土的碱—集料反应。

3．水泥粉煤灰混凝土的配合比设计

混凝土中掺用粉煤灰的方法，可以采用等量取代（水泥）法、超量取代法和外加法等。等量取代是指加入混凝土的粉煤灰取代相同体积的水泥；超量取代是指掺入混凝土中的粉煤

灰分成两部分，其中一部分取代相同体积的水泥，另一部分取代相同体积的砂；外加法是指在混凝土中水泥用量不变的情况下，外加一定量的粉煤灰。

水泥粉煤灰混凝土配合比设计的原理，是以未掺粉煤灰混凝土的配合比为基础，按等稠度和等强度等级的原则，以超量取代法进行调整。设计步骤为：

（1）按照普通混凝土配合比的设计方法，计算不掺粉煤灰时水泥混凝土的基准配合比，得到每立方米混凝土的水泥、水、砂、石用量分别为：C_0、W_0、S_0、G_0。

（2）根据粉煤灰的品质等级，查表 6－12 选定粉煤灰的超量取代系数（$6f$）。根据水泥品质和混凝土种类查表 6－13，选定粉煤灰取代水泥的最大限量百分比 f（%）。

粉煤灰超量取代系数（%） **表 6－12**

粉煤灰级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
超量系数（$6f$）	1.1～1.4	1.3～1.7	1.5～1.2

粉煤灰取代水泥的最大限量 **表 6－13**

混凝土种类	粉煤灰取代水泥最大限量（%）			
	P.Ⅰ或P.Ⅱ	P.O	P.S	P.P
预应力混凝土	25	15	10	—
高强度、耐冻、蒸养钢筋混凝土	30	25	20	15
中低强度、泵送、大体积、地下及水中混凝土	50	40	30	20
碾压混凝土	65	55	45	35

（3）计算粉煤灰取代水泥量、粉煤灰超量部分质量和总掺量。其中

粉煤灰取代水泥量：$F_1 = C_0 \cdot f\%$

粉煤灰超量部分质量：$F_2 = F_1 \cdot (6f - 1)$

粉煤灰总掺量：$F = F_1 + F_2$

（4）计算粉煤灰混凝土的单位体积水泥用量：$C_1 = C_0 - F_1$

（5）计算混凝土的单位体积细集料（砂）用量：$S_1 = S_0 - F_2 \cdot \rho_s / \rho_f$

（6）混凝土中用水量及粗集料用量不变，即：$G_1 = G_0$ $W_1 = W_0$

（7）粉煤灰混凝土的理论表观密度：$\rho_1 = C_1 + F_1 + W_1 + S_1 + G_1$

（8）进行试验室试拌，调整和易性后的实测表观密度为 ρ_0 时，单位体积粉煤灰混凝土的实际配合比为：

$$C = C_1 \cdot \rho_0 / \rho_1 \qquad F = F_1 \cdot \rho_0 / \rho_1$$

$$W = W_1 \cdot \rho_0 / \rho_1 \qquad S = S_1 \cdot \rho_0 / \rho_1$$

$$G = G_1 \cdot \rho_0 / \rho_1$$

其中水与胶凝材料（即水泥与粉煤灰之和）之比称之为水胶比：

$$\frac{W}{F + C}$$

工程中应通过调整混凝土中胶凝材料浆体量，达到所需粉煤灰混凝土的和易性。通过调整水胶比，达到工程所需的粉煤灰混凝土强度。

4．水泥粉煤灰混凝土的应用

在水泥粉煤灰混凝土施工中，粉煤灰是直接掺入水泥混凝土的，现场操作和用量调整比较方便，使得粉煤灰混凝土不仅可以改善多种性能，节约水泥和降低成本，而且使用操作也很方便。因此，水泥粉煤灰混凝土在大体积混凝土、耐腐蚀混凝土、水工混凝土、碾压混凝土、防水混凝土、泵送混凝土、蒸养混凝土，甚至高强混凝土结构中具有广泛的应用前景。

与普通混凝土的应用相比，水泥粉煤灰混凝土在使用时应特别注意粉煤灰的质量品质，使用前必须进行试验。工程实际中，还应注意粉煤灰的实际含水率对混凝土用水量的影响；对于有结块的粉煤灰，应筛除结块或将其粉碎达到要求细度后使用。

二、防水混凝土

防水混凝土也称为抗渗混凝土，它是指具有较高抗渗能力的混凝土，其抗渗等级一般应不低于P6级。它是工程中常采用的刚性防水材料。防水混凝土，主要是在普通混凝土的基础上调整配合比、选择水泥品种、掺加外加剂或混合材料等方法，改善混凝土自身的密实性，达到防水抗渗的目的。

1．混凝土的渗水与防水机理

工程实际中，可能因为原材料或配比不当、集料级配不当、施工质量不良、多余水分蒸发等原因，导致普通混凝土内部产生许多微孔隙。特别是养护不当时可能造成早期收缩，从而产生各种微裂纹等缺陷。在两侧水压力作用下，水易于通过这些微裂纹和微孔隙从一侧渗透到另一侧。可见上述缺陷降低了混凝土的防水能力。

防水混凝土，是针对上述混凝土的孔隙和缺陷，通过选择适当的集料级配、改善胶凝材料内部结构等方法，减少这些缺陷，提高混凝土密实度，达到防水抗渗的目的。

2．防水混凝土的抗渗等级

防水混凝土抗渗等级，是表示其抵抗压力水渗透能力的技术指标，它也是混凝土最重要的耐久性指标之一。对于利用结构混凝土防水的工程，还应同时满足结构对强度的要求。因此，防水混凝土必须有足够的强度。一般防水混凝土的强度不得低于20 MPa，使用温度不得高于100 ℃。处于侵蚀性介质中防水混凝土的耐侵蚀系数不得低于0.8。耐侵蚀系数常以试件分别在侵蚀性介质溶液和饮用水中养护六个月的抗折强度之比来表示。

对结构防水混凝土抗渗等级的要求，主要与结构物防水混凝土的厚度（h）和两侧压差的最大水头（H）有关。其抗渗等级选择可参照表6－14。

防水混凝土抗渗等级选择 表6－14

H/h	<10	10～15	15～25	25～35	>35
抗渗等级	0.6 MPa（P6）	0.8 MPa（P8）	1.2 MPa（P12）	1.6 MPa（P16）	2.0 MPa（P20）

3．防水混凝土对原材料的要求

（1）对水泥的要求

在不受侵蚀性介质和冻融作用时，宜采用普通硅酸盐水泥、火山灰硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥，如采用矿渣硅酸盐水泥时，需要采取措施降低泌水率。在受冻融作用时，应优先选用普通硅酸盐水泥。

不得使用过期或有结块的水泥，水泥用量不宜过低。

（2）对集料的要求

防水混凝土对砂石的要求，除必须满足普通混凝土对集料的要求外，尚要求粗集料最大粒径不宜大于 40 mm，表面不得有黏附泥土，含泥量小于 1.0%，泥块含量小于 0.5%，吸水率不应大于 1.5%。细集料宜采用级配良好的中砂，含泥量小于 3.0%，泥块含量小于 1.0%，砂率宜为 35%～45%。

(3) 对其它物质的要求

宜掺加适量的防水剂、膨胀剂、引气剂、减水剂和细矿物掺合料。对掺入防水混凝土的外加剂应进行试验确定，掺入的磨细粉煤灰不应大于 20%，磨细的砂、石粉掺量不宜大于 5%，所有混合材料都应能通过 0.15 mm 的筛孔。

4. 常用防水混凝土类型

(1) 普通防水混凝土

普通防水混凝土是通过调整集料级配，使混合集料的总空隙率最小，控制水灰比，增大水泥用量，减小集灰比等手段，改善新拌混凝土的稳定性，减少泌水，使硬化混凝土形成密实的结构，减少各种缺陷，从而达到防水抗渗的目的。

(2) 掺外加剂防水混凝土

它是利用外加剂的某种功能，提高混凝土的抗渗性。如用引气剂引入微小气泡，隔断渗水通道。利用防水密实剂形成沉淀胶体堵塞渗水通道。利用高效减水剂大幅度降低水灰比，减少泌水和蒸发水形成的孔隙或毛细孔。

(3) 膨胀水泥或膨胀剂防水混凝土

利用膨胀水泥水化硬化过程中的自身膨胀，使混凝土结构在外界约束的条件下自身结构更加密实，消除各种收缩造成的缺陷，达到防水抗渗的目的。膨胀水泥通常是依靠早期水化的钙矾石结晶产生自身膨胀，因为这种结晶膨胀受温度和湿度的影响较大，所以要加强潮湿养护，保证适宜的环境温度。一般温度不得低于 5 ℃，以便有适当的结晶膨胀速度；也不得高于 80 ℃，防止钙矾石晶体的晶形转变，造成孔隙率增大和抗渗性降低。

在普通硅酸盐水泥中，掺加膨胀剂也能达到防水抗渗的目的。膨胀剂的类型主要有硫铝酸盐型、氧化铁型和氧化钙型等。目前工程中常用的为硫铝酸盐型，其机理与膨胀水泥类似，是通过硫铝酸盐与水泥水化产物间的二次反应，产生钙矾石结晶膨胀，达到补偿收缩或自身挤密的效果。工程中通常根据使用条件选择适当的膨胀剂掺量，并经试验确定使用方法和掺量，其中应注意掺膨胀剂后的膨胀率、膨胀速率、膨胀的开始与结束时间与结构物的要求相适应。

防水混凝土多应用于各种基础工程、地下工程、水工构筑物、屋面或桥面工程等，是一种经济可靠的防水材料。为获得更好的效果，工程中还应根据综合条件，选择适当的防水混凝土方式，以满足耐久性要求，达到结构自防水的目的。

三、轻集料混凝土

以轻粗集料、细集料、水泥和水配制而成的，干表观密度不大于 1 950 kg/m^3 的水泥混凝土称为轻集料混凝土。其中采用轻粗、细集料的为全轻混凝土，采用普通细集料的为砂轻混凝土。

与普通混凝土相比，轻集料混凝土的表观密度较低，强度差别不大，具有较高的比强度。轻集料混凝土还具有较好的防火性与良好的保温隔热性。因此，在高层建筑、大跨度建筑、有保温要求的建筑装饰与装修工程中应用具有明显的优势。

1. 轻集料的要求

粒径不大于 5 mm，堆积密度小于 1 200 kg/m^3 的集料称为轻细集料；粒径大于 5 mm，堆积密度小于 1 100 kg/m^3 的集料称为轻粗集料。根据轻集料的来源划分为：天然轻集料、人造轻集料和工业废料轻集料等。根据轻集料的堆积密度，可划分为不同的密度等级，如轻粗集料的密度等级分别为 200 级到 1 100 级不等；轻细集料的密度等级分别为 500 级到 1 200 级不等。混凝土对轻集料的技术性质和指标要求主要有：

(1) 颗粒尺寸和级配

为保证混凝土的强度及和易性，应控制轻粗集料的最大、最小粒径、中间粒径含量和总空隙率。一般要求应有良好的自然级配，其空隙率应不大于 50%。

因为轻集料本身的强度较低，其粒径越大，特别是颗粒表观密度越小时，配制的混凝土强度就越低。实验研究结果表明，承重混凝土用轻集料最大粒径不宜大于 20 mm；非承重混凝土用轻集料最大粒径不宜大于 40 mm。对于轻细集料，粒径也应适中，大于 5 mm 的颗粒不宜超过 10%，而且应有较好的级配。

(2) 筒压强度和强度等级

在轻集料混凝土中，集料的强度相对较低，它是决定混凝土强度的主要因素。表示轻集料强度高低的指标是筒压强度，它是将 10～20 mm的轻集料按要求装入标准承压筒中，通过冲压模压入 20 mm 深，此时的压力除以承压面积之商，即为轻集料的筒压强度。试验简图见图6－15。一般轻集料的筒压强度值为 0.3～6.5 MPa，对应的实际强度等级约为 3.5～40 MPa。工程也可以利用轻集料配制混凝土直接测定它在混凝土中表现的强度等级。

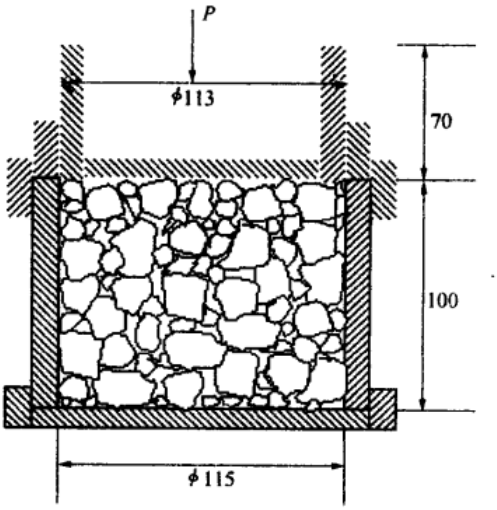


图 6－15　轻集料筒压强度试验简图

(3) 吸水率

轻集料颗粒内部为多孔结构，吸水能力较强。集料过多的吸水会影响混凝土的和易性及早期性能，一般混凝土用轻集料的吸水率不宜大于 22%。轻集料的吸水主要集中在开始 1 小时内，24 小时后几乎不再吸水。因此，通常所指轻集料的吸水率是指其 1 小时的吸水率。工程中要求使用轻集料前，应先使集料吸水达到 1 小时的吸水率，避免集料在混凝土初期吸水影响性能。

(4) 有害物质

为防止有害物质对混凝土的危害，轻集料中不得混入经煅烧的石灰石或白云石等体积不稳定物质。对其它有害物质、集料的耐久性也应进行限制。

此外，还要求轻集料的软化系数与粒形系数满足有关规定。

2. 轻集料混凝土的技术性质

(1) 和易性

轻集料混凝土的和易性应满足施工的要求。与普通混凝土相比，在相同水泥浆用量的情况下，轻集料混凝土的和易性表现为坍落度值较小。轻集料自重轻，其自重坍落趋势轻于普通混凝土，但在施工时受振动后表现出的流动性却接近普通混凝土。因此，在工程条件相同时，对轻集料混凝土的坍落度要求值，应比普通混凝土的要求值稍低些。

影响轻集料混凝土和易性的因素，除了水泥浆用量等因素外，轻集料的吸水性也是一个重要因素，因此轻集料在使用前须充分润湿。即使经过润湿，拌入混凝土后的轻集料吸水能力仍明显高于普通集料，这会影响轻集料混凝土的流动性。为此轻集料混凝土拌和后应及早使用，测定其和易性的时间也应严格控制，一般应在拌和后 15～30 min 内进行。

(2) 密度等级

根据用途的不同，工程对轻集料混凝土的主要技术要求不同，如强度、保温性、自重等，这些性质均与其表观密度紧密相关。因此工程中常通过选择轻集料混凝土的表观密度来满足工程的要求。轻集料混凝土按其干表观密度可分为 12 个密度等级，详见表 6-15。

轻集料混凝土密度等级　　表 6-15

密度等级	干表观密度 (kg/m^3)	密度等级	干表观密度 (kg/m^3)
800	760～850	1 400	1 360～1 450
900	860～950	1 500	1 460～1 550
1 000	960～1 050	1 600	1 560～1 650
1 100	1 060～1 150	1 700	660～1 750
1 200	1 160～1 250	1 800	1 760～1 850
1 300	1 260～1 350	1 900	1 860～1 950

(3) 抗压强度

根据轻集料混凝土的抗压强度可分为：CL5.0、CL7.5、CL10、CL15、CL20、CL25、CL30、CL35、CL40、CL45 和 CL50 等 11 个强度等级。不同强度等级的轻集料混凝土应满足相应的抗压强度要求。

影响轻集料混凝土强度的主要因素有集料性质、水泥浆强度及施工质量等。从轻集料混凝土的内部结构来看，由于集料的早期吸水使得集料与水泥浆界面的局部水灰比变小，而且集料的吸水又有利于该局部的养护，造成界面黏结牢固。然而其它处的水泥浆相对强度较低，特别是轻集料颗粒本身的强度可能更低。这种情况与普通水泥混凝土差别较大。因此，集料本身的强度（或筒压强度）、集料的颗粒级配、水泥浆的用量和强度等，是决定轻集料混凝土的主要因素。此外，施工中集料的预润湿、振实及养护情况也是影响强度的重要因素。

(4) 其它性质

轻集料混凝土的弹性模量要比普通混凝土低 25%～65%，硬化过程中的收缩率比普通混凝土大 20%～50%，徐变变形比普通混凝土大 30%～60%，热膨胀系数比普通混凝土小约 20%，导热系数降低 25%～75%，耐火性与抗冻性有不同程度的改善。

第九节　建筑砂浆

建筑砂浆是由胶凝材料、细集料、水及外加剂拌制而成的可塑性建筑材料。工程中使用砂浆的品种有多种，常从不同角度来划分：

1. 根据砂浆的用途不同可分为砌筑砂浆、抹灰砂浆、保温砂浆等。

2. 按照砂浆中所用胶凝材料的不同可分为水泥砂浆、石灰砂浆及混合砂浆等。

3. 根据被砂浆所黏结材料的吸水能力，还可分为砌石砂浆和砌砖砂浆。砌石砂浆通常用于砌筑或黏结不吸水的材料（如密实的石材）；砌砖砂浆通常用于砌筑或黏结吸水性强的材料（如黏土砖）。

因为砂浆与混凝土的组成基本接近，可认为砂浆应是混凝土的一种特例，所以有关混凝土的凝结硬化机理、强度发展规律、和易性及耐久性的影响因素等，原则上也适于砂浆。但是砂浆在工程中的使用环境与状态又与混凝土有很大的差别。因此，对于学习有关砂浆的知识，是在掌握了混凝土有关理论的基础上，进一步掌握砂浆的性能特点和应用特点。

一、砌筑砂浆

在砌筑工程中，砌筑砂浆是将分散的块体材料凝固、黏结为整体，并使荷载均匀传递的材料，它是决定砌体工程质量的主要因素，是土木建筑工程不可缺少的基本材料。

1. 砌筑砂浆对原材料的要求

（1）对水泥的要求

配制砌筑砂浆可使用硅酸盐系的普通水泥、矿渣水泥、火山灰质水泥、粉煤灰水泥、砌筑水泥、无熟料或少熟料水泥等。考虑砂浆的要求强度一般不高，通常所用水泥的强度为砂浆强度的3～5倍。

（2）对细集料的要求

用于砌筑石材的砂浆，细集料的最大粒径应小于砂浆层厚度的1/4～1/5。砌砖用砂浆应采用粒径＜2.5 mm，细度模数 $M_X=3.0\sim2.3$ 的细集料；要求砂浆强度≥5 MPa时，含泥量和泥块含量应≤5%；要求砂浆强度＜5 MPa时，含泥量和泥块含量应≤10%。

（3）对矿物掺合材料的要求

掺入混合材料能改善砂浆的和易性、调整强度、节约水泥和细集料用量。常用的混合材料有石灰膏或石灰粉、黏土膏、粉煤灰或细炉灰等工业废料。工程中要求这些材料不得含有影响砂浆性能的有害物质，含有颗粒或结块时应过3 mm的方孔筛。

（4）对外加剂的要求

与混凝土中掺加外加剂一样，砂浆中加入起塑化、早强、防冻、缓凝等作用的外加剂也可改善其某些性能。一般多使用无机外加剂，其品种和掺量应经试验确定。

砂浆对拌和用水的要求与混凝土相同。

2. 砌筑砂浆拌和物的技术性质

（1）砂浆的流动性

表示砂浆在自重或外力作用下流动的性能称为砂浆的流动性，也叫稠度。表示砂浆流动性大小的指标是沉入度，它是以砂浆稠度仪测定的，其单位为mm。工程中对砂浆稠度选择的依据是砌体类型和施工气候条件，可参考表6－16。

砌筑砂浆流动性（沉入度mm）选择 **表6－16**

砌体类型	干燥气候	寒冷气候
振实毛石砌体	20～30	10～20
普通毛石砌体	60～70	40～50
炉渣混凝土砌块砌体	70～90	50～70
砖或多孔砌块砌体	80～100	60～80

影响砂浆流动性的因素有：砂浆的用水量、胶凝材料的种类和用量、集料的粒形和级配、外加剂的性质和掺量、拌和的均匀程度等。

(2) 砂浆的保水性

搅拌好的砂浆在运输、停放和使用过程中，能够阻止水分与固体料之间、细浆体与集料之间相互分离，保持水分的能力为砂浆的保水性。保水性差的砂浆会产生如下影响：

a. 运输和停放过程中的分离可使砂浆内部上下层之间的组成差别很大，容易出现上层细浆和下层沉砂的现象。此时，砂浆的流动性、黏结能力和变形性能难以满足施工要求。

b. 运输和停放过程中的泌水，使大量水分及部分胶凝材料丢失，砂浆的流动性下降，难以铺成均匀密实的砂浆薄层。

c. 砌筑后的砂浆内，水分很快被块体基面吸走而过早失水，致使水泥难以水化，砂浆强度和黏结力严重下降。

影响砂浆保水性的主要因素有：胶凝材料种类和用量、集料的级配、用水量及外加剂等。工程中常通过增加细矿物掺合材料量、加入外加剂，使其产生微小气泡等手段来改善砂浆的保水性。

砂浆的保水性以分层度表示，分层度是通过分层度筒试验测定的，它是指经停放后分层度筒内上下层砂浆的流动性差异。分层度大的砂浆说明保水性差，不利于施工。一般砌筑砂浆的分层度为 10～20 mm，大于 30 mm 时难以施工；分层度小于 10 mm 时可能砂浆集料太少，硬化后会产生开裂。

(3) 砂浆的凝结时间

砂浆的凝结时间是指规定条件下，自加水拌和起，直至砂浆凝结时间测定仪测定的惯入阻力值为 0.5 MPa 时所需的时间。砂浆的凝结时间决定了工程施工速度和砂浆拌和后的允许运输和停放时间，一般水泥砂浆不宜超过 8 h，水泥混合砂浆不宜超过 10 h。影响砂浆凝结时间的因素有胶凝材料的种类、用水量、失水速度及气候条件等，必要时可加调凝剂调节凝结时间。

3. 砌筑砂浆硬化后的技术性质

(1) 砂浆的强度和强度等级

砌筑砂浆的强度通常指立方体抗压强度，即按要求制作的 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm的标准尺寸试件，六块一组，在标养温度（20±2℃）和规定湿度条件下养护 28 d，测得的抗压强度评定值。规定的养护湿度为，水泥混合砂浆试件要求相对湿度 60%～80%；水泥砂浆试件要求相对湿度在 90%以上。

根据砂浆抗压强度所划分的若干等级，称为砂浆的强度等级，并以“M”和应保证的抗压强度值（MPa）表示，其强度等级分别为 M2.5、M5.0、M7.5、M10、M15、M20。

影响砂浆强度的因素有材料性质、配比、施工质量等。此外，还受被黏结块体材料的表面吸水性影响，以黏土砖为代表的吸水性砌体中砂浆的强度设计通常采用下述方法。

砖砌体砂浆的强度与其砌筑后砂浆内的剩余水灰比有关。因为砂浆中水被吸水基层吸收后，剩余的水量大致相同。当砂浆中水泥用量不同时，其剩余水灰比则不同。所以水泥用量成为决定强度的主要因素，而拌和时的原始水灰比几乎不影响砂浆的强度。此时的强度计算公式为：

$$f_{mu} = f_{ce} \cdot m_{ce} \cdot \alpha / 1\,000 + \beta$$

式中 f_{mu}——砌砖砂浆的 28 d 立方体强度（MPa）；

f_{ce}——所用水泥的强度（MPa），它可实测或由统计资料确定；

m_{ce}——每立方米砂浆的水泥用量（kg）；

α、β——砂浆特征的经验系数，可参照表 6－17。

砂浆的特征经验系数 α、β 参考值 **表 6－17**

砂浆品种	α	β
水泥混合砂浆	3.03	－15.09
水泥砂浆	1.03	3.50

注：各地区可根据本地区试验资料统计确定 α、β 值，但统计用试验组数不得少于 30 组。

（2）砌筑砂浆的黏结强度

砌筑砂浆必须有足够的黏结力，才能将砌筑块体黏结为坚固的整体，砂浆黏结力的大小，将影响砌体的抗剪强度、耐久性、稳定性及抗震能力。通常黏结力随砂浆抗压强度的提高而增大。砂浆黏结力还与砌筑材料的表面状态、润湿程度、养护条件等有关。因此，砌筑前应将砌筑块体表面清理干净，必要时凿毛，砌砖前应浇水润湿，砌筑后应适当养护。

4．砌筑砂浆的配合比设计

依据《砌筑砂浆配合比设计规程》（JGJ 98—2000），砌筑砂浆应满足施工和易性（稠度）的要求，保证设计强度，还应尽可能节约水泥，降低成本。

一般要求水泥砂浆的表观密度不应小于 1900 kg/m^3；水泥混合砂浆的表观密度不应小于 1 800 kg/m^3。水泥砂浆中水泥用量不宜小于 200 kg/m^3；水泥混合砂浆中胶结细料总量应在 300～350 kg/m^3 之间，在满足流动性及保水性的前提下，宜少用混合材料。有抗冻性要求时，应经冻融试验使其质量损失不大于 5%，强度损失不大于 25%，满足要求的冻融循环次数。

砌筑砂浆的配合比设计有计算调整法和经验配合比法，这里主要介绍计算调整法设计配合比的步骤。

（1）砌筑砂浆配制强度（$f_{m,o}$）的确定

$$f_{m,o} = f_{m,k} + 1.645\sigma = (f_m - \sigma) + 1.645\sigma = f_m + 0.645\sigma$$

式中 $f_{m,o}$——砂浆的配制强度，精确至 0.1 MPa；

$f_{m,k}$——砂浆强度设计标准值（MPa）；

f_m——砂浆抗压强度平均值 MPa；

σ——砂浆现场强度标准差，精确至 0.01 MPa。

砌筑砂浆现场强度标准差应按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_{mi}^2 - n\mu_{fm}^2}{n-1}}$$

式中 f_{mi}——统计周期内同一品种砂浆第 i 组试件的强度（MPa）；

μ_{fm}——统计周期内同一品种砂浆 n 组试件强度的平均值（MPa）；

n——统计周期内同一品种砂浆试件的总组数，$n \geqslant 25$。

当无近期统计资料时，砂浆现场强度标准差 σ 可参考表 6－18。

砂浆强度标准差 σ 参考值（MPa） **表 6－18**

施工水平	砂浆强度等级					
	M2.5	M5.0	M7.5	M10	M15	M20
优　良	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00
一　般	0.62	1.25	1.88	2.50	3.75	5.00
较　差	0.75	1.50	2.25	3.00	4.50	6.00

（2）水泥用量的计算

对于砌砖砂浆，根据强度公式计算每立方米砂浆的水泥用量 m_{ce} 为

$$m_{ce} = \frac{1\,000(f_{m,o} - \beta)}{\alpha \cdot f_{ce}}$$

当计算出的水泥用量不足 200 kg/m³ 时，取 $m_{ce}=200$ kg/m³。

（3）砂浆掺加料掺量的确定

为保证良好的流动性和保水性，砂浆中胶结细料总量 m_c 应不低于 300～350 kg/m³，当 $m_{ce}<m_c$ 时，水泥混合砂浆中掺加料掺量 m_{ad} 为：

$$m_{ad} = m_c - m_{ce}$$

式中　m_{ad}——水泥混合砂浆中掺加料掺量（kg/m³）；

m_c——水泥混合砂浆中胶结细料总量（kg/m³）。

为保证砂浆流动性，所用膏状混合材料的稠度以 120±5 mm 为标准，当实际灰膏较稠时，可按表 6－19 的换算系数进行换算调整。

石灰膏不同稠度时的掺量换算系数（mm） **表 6－19**

灰膏稠度	120	110	100	90	80	70	60	50	40
换算系数	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.88	0.87

（4）细集料用量的确定

每立方米砂浆中细集料用量，以干燥状态（含水率小于 0.5%）的自然堆积体积 1 立方米为准。因此，工程实际中常以砂子的自然堆积密度值作为砂浆中每立方细集料的用量。

（5）单位立方砂浆用水量的确定

每立方米砂浆的用水量可根据经验选取，也可按照表 6－20 选用。

每立方米砂浆用水量参考值（kg/m³） **表 6－20**

砂浆品种	混合砂浆	水泥砂浆
用水量	260～300	270～330

注：混合砂浆中的用水量不包括石灰膏或黏土膏中的水。

（6）配合比的试配、调整与确定

根据计算配合比试拌砂浆，测定其稠度和分层度，若不满足要求，应调整配比，使其符合要求，此时的配比即为基准配比。

在基准配比的基础上，分别使水泥用量增减10%，得两个调整配比。分别以基准配比和两个调整配比配制三组砂浆，两个调整配比应相应调整用水量和混合材料掺加量，使三个配比的稠度和分层度均满足要求。

以上述三个配比配制的砂浆按规定制作三组试件，并测定各组的强度，从中选择强度满足要求，且水泥用量较少的配比确定为砂浆的试验室配比。

5．砌筑砂浆配合比设计实例

某工程用砌砖砂浆设计强度等级为M10，要求稠度为80～100 mm的水泥石灰砂浆，现有砌筑水泥的强度为35.5 MPa，细集料为堆积密度1450 kg/m^3的中砂，含水率为3%，已有石灰膏的稠度为100 mm，施工水平一般。要求计算此砂浆的配合比。

解：

根据已知条件，施工水平一般的M10砂浆的标准差$\sigma=2.5$ MPa，则此砂浆的试配强度为

$$f_{m,o}=f_m+0.645\sigma$$
$$=10+0.645\times2.5=11.612\ \text{MPa}$$

计算水泥用量 $m_{ce}=\dfrac{1\,000\times(11.612+15.09)}{3.03\times35.5}=248.2\ \text{kg/m}^3$

计算石灰膏用量 $m_{ad}=m_c-m_{ce}$取细胶结料总量 $m_c=300\ \text{kg/m}^3$

得：$m_{ad}=300-248.2=51.8\ \text{kg/m}^3$

查表得稠度为100 mm的灰膏换算为120 mm时需乘以0.97，则应掺加石灰膏量为

$$51.8\times0.97=50.2\ \text{kg/m}^3$$

砂用量为 $S=1\,450\times(1+0.03)=1\,493.5\ \text{kg/m}^3$

根据表6－20选择用水量为300 kg/m^3

至此砂浆的设计配比为：

水泥∶石灰膏∶砂∶水＝248.2∶50.2∶1493.5∶300

6．砌筑砂浆的经验配合比

工程中，可根据经验数据确定砂浆配合比，也可查有关资料选择初步配合比，再进行试验室试配和调整。表6－21为采用32.5级水泥时的砌筑砂浆参考配合比。

砌筑砂浆配合比参考表（质量比） 表6－21

砂浆强度等级	水泥砂浆（水泥∶砂）	水泥混合砂浆	
		水泥∶石灰膏∶砂	水泥∶粉煤灰∶砂
M2.5	—	1∶2.10∶13.9	—
M5.0	1∶5.0	1∶0.97∶8.85	1∶0.63∶9.10
M7.5	1∶4.4	1∶0.63∶7.30	1∶0.45∶7.25
M10	1∶3.8	1∶0.40∶5.85	1∶0.30∶4.60

7．砌筑砂浆的选择和应用

工程中应根据砌体的种类、要求性能和所处环境选用砂浆品种，一般水中或潮湿严重环境中应选用水泥砂浆。一般潮湿环境宜选用水泥混合砂浆；干燥环境中可选用石灰砂浆或石

灰混合砂浆。

二、抹面砂浆与防水砂浆

根据抹面砂浆的功能或使用要求不同，抹面砂浆又分为普通抹面砂浆和防水抹面砂浆等。对它们的基本要求是必须有良好的保水性、抗裂性和与基底的黏附性，根据其使用特点还要求某些特殊性能。

1. 普通抹面砂浆

普通抹面砂浆的功能是保护结构主体免遭各种侵害，提高结构的耐久性，改善结构的外观。常用的普通抹面砂浆有石灰砂浆、水泥砂浆、水泥混合砂浆、麻刀石灰浆或纸筋石灰浆。一般潮湿或易磕碰的环境中应选水泥砂浆或水泥混合砂浆，干燥环境宜选择麻刀石灰浆或纸筋石灰浆。

为改善抹面砂浆的保水性和黏结力，其胶凝材料用量应比砌筑砂浆多，必要时还可加入改性材料，以增强其黏结力。为提高抗拉强度、防止抹面砂浆的开裂，常加入部分麻刀等纤维状材料。普通砂浆抹面通常分层施工，要求砂浆的流动性好，集料粒径较细，抹面砂浆的流动性及集料最大粒径可参考表 6－22。

抹面砂浆要求流动性和集料最大粒径 **表 6－22**

抹面层名称	人工抹面时要求砂浆沉入度（mm）	集料最大粒径（mm）
底　层	100～120	2.5
中　层	70～90	2.5
面　层	70～80	1.2

2. 防水砂浆

防水砂浆是指通过调整砂浆配比，采用特定施工工艺，使砂浆硬化后具有良好的防水、抗渗性能的水泥砂浆。

防水砂浆要求所用砂子必须洁净，以中砂为好，水泥应为合格的普通水泥；水泥与砂之比约为 1:2.5，水灰比为 0.50～0.60，稠度约 80 mm。为获得较高的抗渗性，常加入防水剂，如硅酸钠类、金属皂类、氯化物金属盐及有机硅类等外加剂，使用防水剂前应进行试验以确定合理的掺量与配制工艺。

防水砂浆的特殊施工工艺有人工多层抹压法和砂浆喷射法等，这些都是为了减少砂浆层内连通孔隙、毛细孔，达到防水抗渗的目的。

第七章　沥青与沥青混合料

在土木建筑工程中，沥青是应用广泛的防水材料和防腐材料，主要用于屋面、地面、地下结构的防水，木材、钢材的防腐。沥青还是道路工程中应用广泛的路面结构胶结材料，它与不同组成的矿质集料按比例配合后可以建成不同结构的沥青路面，如沥青碎石、沥青混凝土、或沥青贯入式等路面结构。

沥青材料是由一些分子结构极复杂的高分子碳氢化合物和这些碳氢化合物的非金属（氧、硫、氮）衍生物所组成的混合物。常温下沥青是黑色或褐色的液体、固体或半固体，这主要取决于沥青的相对组成。沥青按其在自然界中获得的方式，可分为地沥青（包括天然地沥青和石油地沥青）和焦油沥青（包括煤沥青、木沥青、页岩沥青等）。其中在土木工程中最常用的主要是石油沥青（Petroleum asphalt）和煤沥青（Coal tar）。

本章结合路面工程与防水工程的应用，主要讨论了沥青与沥青混合料的基本理论、基本性能、工程性质、技术要求和技术标准；介绍沥青在土木建筑工程中的主要应用方法和要求。通过学习本章的内容，力求掌握石油沥青的基本性质和技术标准，能够评价沥青的工程性质；了解沥青混合料的强度形成原理、矿质混合料和沥青混合料的级配原理及配比设计方法，熟悉沥青混合料的技术性质和技术要求。能够在道路工程、防水工程和防腐工程中正确使用石油沥青。

第一节　石油沥青

一、石油沥青概述

石油沥青是以原油为原料，经过常压蒸馏、减压蒸馏等提炼过程，提取汽油、煤油、柴油、重柴油、润滑油等产品后得到的渣油，通常这些渣油属于低牌号的慢凝液体沥青。为改善沥青的使用性能，常以这些渣油为原料，采用某些工艺和方法进一步加工制成黏稠沥青。

根据石油沥青的生产加工工艺不同可制得直馏沥青、氧化沥青、溶剂沥青等。性能与状态不同的石油沥青在土木建筑工程中的用途不同，根据其用途的不同可分为以下三类：

1. 道路石油沥青。它是用于路面工程的沥青，通常为直馏沥青或氧化沥青。
2. 建筑石油沥青。它是土建工程中用于防水、防腐的沥青，通常为氧化沥青。
3. 普通石油沥青。它是含石蜡较多的直馏或氧化沥青，一般不单独使用。

为得到不同稠度的沥青，可以采用硬沥青与软沥青（或黏稠沥青与液体沥青）按适当比例调配出所需要的沥青，这种沥青称为调配沥青。调配沥青可以是黏稠沥青，亦可以是慢凝液体沥青。

为满足工程的某种需要，可在黏稠沥青中掺加煤油或汽油等挥发速度较快的溶剂，这种用快速挥发溶剂稀释的沥青，可以是快凝液体沥青或中凝液体沥青。

快凝液体沥青需要耗费高价的有机稀释剂，同时要求被胶结基材必须干燥。为节约能源和成本，减少环境污染，可将沥青分散于有乳化－稳定剂的水中而形成沥青乳液，这种沥青

乳液称为乳化沥青。

为更好地发挥石油沥青和煤沥青的优点，可以选择适当比例的煤沥青与石油沥青混合制成稳定的胶体，这种胶体称为混合沥青。

二、石油沥青的组分与结构

石油沥青的主要组分是碳氢化合物及其非金属衍生物，其化学成分主要是碳（约占总质量的80%左右）和氢（约占总质量的10%以上），其次是少量的氧、硫、氮等非金属元素。组成沥青的物质分子量多在1 000以上，其中的碳氢比（即分子中碳原子个数与氢原子个数的比值）在一定程度上决定了沥青的常温物理状态，碳氢比高的分子表现出较高的稠度。其它非金属元素的含量及其在碳氢化合物中的表现也对沥青性能有较大影响。

石油沥青的化学组成十分复杂，难以根据分子类型或结构来划分组分，为了研究和使用上的方便，人们把石油沥青中化学组成相似且物理性质相近的部分物质划分为同一个组，这样就可以把沥青看作是由多个组分组成的混合物。工程中通常把石油沥青划分为三个主要组分，并将其分别称之为油分（Oil）、树脂（Resin）、沥青质（Asphaltene），它们的主要特征和作用见表7-1。沥青中这三大组分相对含量的多少，直接影响到使用沥青的一系列工程性质。

石油沥青的主要组分特征和作用 **表7-1**

组　分	碳氢比	性质与状态	含　量	作　用
油　分	0.5～0.7	浅色液体，可溶于大部分溶剂，密度约0.91～0.93	40%～60%	使沥青具有流动性
树　脂	0.7～0.8	深色黏稠半固体，温度敏感性强，密度1.0以上	15%～30%	使沥青具有黏性和塑性，还可增加黏附性
沥青质	0.8～1.0	深色固体颗粒，加热不熔，不溶于溶剂	10%～30%	增加沥青黏性，稳定性

借助三大组分的基本概念，可以研究和解释不同性状石油沥青的组成结构。根据石油沥青的三组分分析法，石油沥青是由以沥青质为核心，周围吸附部分树脂后形成的胶团作为分散相，油分作为溶剂而形成的胶体结构。在这种胶体结构中，只有树脂可以浸润沥青质，并能均匀分散于油分中，而沥青质是不能直接分散于油分中的。

在石油沥青的胶体结构中，三种组分的相对含量不同时，会形成性能、状态不同的沥青。当沥青质含量较少，油分和树脂含量较多时，沥青质胶团在油分中间距较大，胶团间的相对运动较为容易。因此其黏性小，流动性大，塑性强，温度稳定性差，这种结构被称之为溶胶结构，如图7-1（a）。它是液体石油沥青的结构特征。

当沥青中含有适量的沥青质时，油分的含量相对较少，沥青质胶团间距很小或有黏附，使其相对运动有一定的阻力。因此它在受到外力作用时，开始会表现出明显的弹性效应，有一定的抗变形能力；当外力较大时会表现出较大的塑性变形能力，这种结构被称之为溶-凝胶结构，如图7-1（b）。它是常温下呈半固体或固体状黏稠石油沥青的结构特征。

当沥青质含量较多，油分和树脂含量较少时，沥青质胶团间相互连结成了不规则的空间网状结构，外力作用下表现有一定的弹性效应和较强的抗变形能力，具有较强的稳定性。但是，当外力较大时，其塑性很小，这种结构被称之为凝胶结构，如图7-1（c）。它是过于黏稠或经过老化的石油沥青的结构特征。

温度也是影响石油沥青结构性能的因素之一，因为沥青的某些成分，特别是树脂中的某些成分以及石蜡等温度敏感性较强。当温度升高时，这些成分会转变为流动性更好的液体，使其胶体结构向溶胶结构方向发展；当温度降低时，这些成分会转变为更为黏稠的固体或半固体，

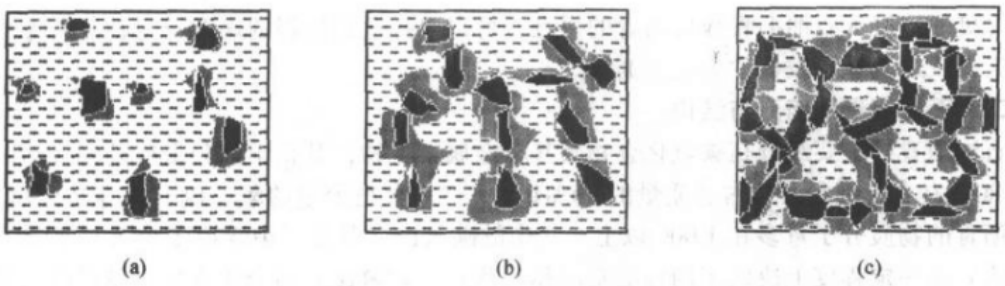


图 7-1　沥青三组分胶体结构示意图

(a) 溶胶型结构；(b) 溶—凝胶型结构；(c) 凝胶型结构

其胶体结构向凝胶结构方向发展。因此，描述石油沥青的结构特征时应指明相应的温度。

三、石油沥青的技术性质

1. 沥青的密度与相对密度

沥青密度是在规定温度条件下单位体积的质量，其常用单位是 g/cm^3。我国现行标准规定，沥青在温度为 15 ℃时所测得的密度为标准密度。沥青的密度与其组分构成有密切的关系，通过测定沥青的密度，可以大概地了解沥青组分的相对含量，通常黏稠沥青的密度波动在 0.96～1.04 范围之间。

相对密度是指在规定温度下沥青质量与同体积水的质量之比。我国现行交通行业标准《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》（JTJ052－2000）规定，沥青与水的相对密度是指 25 ℃相同温度下的相对密度。

沥青 15 ℃密度与 25 ℃相对密度之间可由下述经验公式换算：

沥青与水的相对密度（15 ℃/25 ℃）＝沥青的密度（15 ℃）×0.996

2. 黏滞性

黏滞性（简称黏性），也称稠度，它是指沥青在外力作用下抵抗变形的能力。沥青在工程中可能受到各种力的作用，如重力、温度应力、车轮荷载等。在沥青路面中，沥青作为黏结材料将矿料黏结起来，形成强度，沥青的黏滞性决定了路面的力学行为。为防止路面夏天出现车辙，冬天出现开裂，沥青的黏性选择是首要考虑的参数。沥青的黏性通常用黏度表示，它是划分沥青等级（牌号）的主要依据。

（1）沥青黏度的表达方式

考虑沥青的胶体结构与沥青在不同温度条件下的状态，根据流变学的原理，可将沥青分别视为牛顿流型液体（其剪应力和剪变率服从虎克定律）和非牛顿流型液体。对溶胶型沥青或在高温条件下的沥青，可视为牛顿液体，其黏度表示为：

$$\eta = \tau/\gamma$$

式中　η——动力黏度系数（简称黏度）（Pa·s）；

τ——剪应力（Pa）；

γ——剪应变速率（1/s）。

这种以长度、质量和时间等绝对单位表示的黏度称为“绝对黏度”。

在运动状态下，考虑沥青密度对黏度的影响，可采用运动黏度来描述。即沥青在某一温度下的动力黏度与同温度下沥青密度之比，称为运动黏度（v），并表示为：

$$v = \eta/\rho$$

式中 v——运动黏度（$10^{-4}m^2/s$）；

η——动力黏度（Pa·s）；

ρ——密度（g/cm^3）。

（2）沥青黏度的测定方法

沥青黏度的测定方法可分为两大类。一类为绝对黏度，另一类为相对黏度（或称条件黏度）。绝对黏度测定比较麻烦，不便于在工程上应用，工程中通常只测定沥青的条件黏度，并将它作为划分沥青牌号的依据。

a. 标准黏度计法

我国现行试验方法规定：测定液体沥青等材料流动状态的黏度时，应采用标准黏度计，该试验方法是：在标准黏度计中，液体状态的沥青，于规定的温度条件下，通过规定的流孔直径，流出 50 ml 体积，所需的时间秒数（s）被称为沥青的黏度，并以 $C_{T,d}$表示（T 为试验温度℃，d 为流孔直径 mm）。在温度和流孔直径相同的条件下，流出 50 ml 所需时间愈长，表明沥青的黏度愈大。

b. 针入度法

该方法适用于测定黏稠沥青的黏度，它是在规定温度和时间条件下，一定重量的标准针，垂直贯入试样的深度表示沥青的针入度值，并以 0.1 mm 为单位。沥青的针入度用 $P_{T,m,t}$表示，其中 P 为针入度，T 为试验温度，m 为标准针（包括连杆及砝码）的质量，t 为贯入时间。我国现行试验通常采用的试验条件为 $P_{25℃,100g,5s}$，根据需要若采用其它试验条件时，应在试验结果中注明。针入度值是衡量沥青黏稠程度的一种指标，通常针入度值较小的沥青，表明其稠度较高，黏度亦较高。

3. 热稳定性与软化点

沥青的热稳定性是指沥青物理性能随温度变化的性质。沥青是一种组成和结构非常复杂的非晶质高聚物，它由液态转变为固态时，其胶体结构由溶胶结构向凝胶结构方向发展，其间必然产生溶－凝胶结构作为过渡，因此不会表现出敏感的固化点或液化点。对于沥青的物理性质与温度之间的关系，通常采用产生硬化与滴落时相对应的某一温度区域范围来表示，在此温度区间内，沥青是一种黏滞流动状态。在工程实际中为保证沥青不致由于温度升高而产生流动，取这一温度区间的 0.872 1 倍作为反映沥青物理状态与温度之间关系的参数，并称之为软化点。

我国现行检测沥青软化点的试验方法（GB/T4507—94 或 JTJ 052T0606—2000）是采用环与球法，它是先将沥青试样浇注在内径为 19.8 mm 的金属环内，上置一直径 9.53 mm、质量为 3.5 g 的钢球，放于水（或甘油）中，以规定的加热速度（5 ℃/min）下加热，钢球下沉达 25.4 mm 时的温度定义为沥青的软化点，并以 $T_{R\&B}$（℃）表示。

试验研究结果表明，沥青在软化点时的黏度约为 1 200 Pa·s 或相当于针入度值为 800（1/10 mm）。据此可以理解为软化点是一种人为的“等黏温度”，针入度是在规定温度下测定沥青的条件黏度，而软化点则是沥青达到规定条件黏度时的温度。由此可见，软化点既是反映沥青材料热稳定性的一个指标，也是沥青黏度的一种量度。

4. 延性和脆性

（1）延性

沥青的延性是当其受到外力拉伸作用时，所能产生塑性变形的能力。沥青的延性通常以

延度作为条件延性指标来表征，沥青延度值的大小直接反映了工程中沥青在外力作用下，保持内部结构连续或抵抗开裂的能力。沥青的延度值是采用延度仪测定的，它是将沥青试样制成8字形标准试件（最小断面1 cm^2），在规定的试验温度（通常为25℃或15℃）和拉伸速度（通常为5 cm/min）条件下，拉断时的长度伸长值（以cm计）。在科研中有时需要测定沥青低温（0℃，4℃）时的延度，其拉伸速度常为1 cm/min，对此应特别注明。

沥青的针入度、软化点和延度是划分沥青牌号的主要依据，称为沥青的三大指标。

（2）脆性

工程中的沥青防水层或沥青路面在温度降低时会产生体积收缩，当沥青的低温变形能力较小时，可能产生由于温度应力造成的开裂。沥青路面和露天防水结构在低温时的破坏主要是这个原因。试验研究结果表明，沥青材料的低温开裂与其脆性有关，沥青在常温下为黏弹性体，但在低温下常表现为脆性。沥青低温下的脆性反映了沥青抗低温的能力，通常采用弗拉斯（Frass）脆点作为衡量沥青抗低温能力的条件脆性指标。

沥青脆性指标的测定比较麻烦，它是在特定条件下，涂于金属片上的沥青试样薄膜，因被冷却和弯曲而出现裂纹时的温度，以℃表示。

5．耐久性

无论是用作路面结构材料，还是用作防水或防腐材料，都要求沥青有较长的使用寿命。但是，沥青在各种因素的综合作用下，能够产生“不可逆”的化学变化，导致其工程性质的逐渐劣化，这种变化过程称为“老化”。其主要表现为有效成分（如树脂等）的减少和延性能力的下降。沥青一旦老化，就可能导致许多工程性质劣化。因此，为长时间保持沥青的工程性质，要求沥青材料具有较好的耐久性。沥青材料耐久性优劣主要决定于其组成和结构，使用环境和施工质量也是重要的影响因素。

（1）影响沥青耐久性的主要因素

a．热的影响

热能加速沥青成分中分子的运动，除了引起沥青中轻质油分挥发外，还会促进某些化学反应的加速，导致沥青成分和结构的改变，并使技术性能降低。尤其是在施工加热（160～180℃）时，由于有空气中氧的参与和共同作用，可使沥青的性质产生严重劣化。因此，沥青在施工时加热温度不能过高，时间也不能过长。

b．氧的影响

沥青在加热的条件下，能促使其组分对空气中氧的吸收，并产生脱氧作用，使沥青的组分发生转变。

c．光的影响

沥青在日光（特别是紫外线）的照射下，能产生光化学反应，促使氧化速率加快，加快老化速度。

d．水的影响

水在与光、氧和热共同作用时能起催化剂的作用，水还能使沥青从基材上剥落，导致沥青与空气接触面增大，促使沥青从内部老化，从而影响其耐久性。

综上所述，沥青在施工过程中，需要加热以取得良好的流动性，建（构）筑物建成后又要经受光、热、水等自然因素的作用，难以避免沥青的老化，从而降低其使用寿命。此外，工业环境中的臭氧以及各种荷载因素等的作用，也会对沥青耐久性有不利影响。

（2）沥青耐久性的评价方法

对于因施工加热导致沥青性能的变化，根据使用条件和要求不同可采用不同的评价方法。我国现行标准规定，对中轻交通量道路用石油沥青，可以采用“蒸发损失试验”，对重交通量道路用石油沥青应进行“薄膜加热试验”，对液体沥青则应进行“蒸馏试验”。

其主要试验方法与要求为：

a．沥青蒸发损失试验

将沥青试样 50 g 放入直径为 55 mm、深为 35 mm 的器皿中，在 163 ℃的烘箱中加热5 h，然后测定试样的质量损失和残留物的针入度所占原试样针入度的百分率（针入度比）。鉴于这种方法中沥青试样与空气接触面积太小，试样较厚，其试验结果往往与工程实际偏差较大。

b．沥青薄膜加热试验

它也称为“薄膜烘箱试验”。其试验方法是将 50 g 沥青试样，放入内径 139.7 mm、深为 9.5 mm 的铝皿中，使沥青成为厚约 3 mm 的薄膜。沥青薄膜在 163 ± 1 ℃的标准烘箱中加热 5 h。以加热前后的质量损失、针入度比、25 ℃及 15 ℃的延度值作为评价指标。

薄膜加热试验后的性能变化与沥青在加热拌和机中加热拌和后的性能变化有很好的相关性。为缩短试验时间，近来又多采用“旋转薄膜烘箱试验”。其特点是试样在垂直方向旋转，沥青膜较薄，能连续鼓入热空气，以加速老化，使试验时间缩短为 75 min；并且也具有精度较高的试验结果。

c．蒸馏

检测液体沥青的耐久性可采用蒸馏试验来代替蒸发损失试验。液体沥青的黏度较低，施工中可以直接冷态（或稍加热）使用，通过液体沥青中轻质馏分的挥发，沥青黏度明显提高，从而获得所需的黏聚力。蒸馏试验主要是确定液体沥青中含有轻质挥发性油的数量，以及轻质油挥发后沥青性质变化的程度。

蒸馏试验是在标准蒸馏器内进行加热，将沸点范围和物理化学性质相近的油分划分为几个馏程。为使馏分范围标准化，将其划分为 225 ℃、315 ℃和 360 ℃等 3 个馏程。为了确定 360 ℃挥发性油排出后沥青的性质，残留沥青应进行 25℃延度和浮漂度试验，据此评价残留沥青工程性质的变化情况。

6．含蜡量

大多数石油中都含有蜡成分，当这些蜡残留于沥青中时，会对沥青的许多性能造成不利影响。试验研究和工程实践表明，沥青中蜡的存在，在高温时容易使沥青发软，导致其高温稳定性降低，出现流淌、变形或路面车辙等现象。低温时会使沥青变脆，导致其低温抗裂性降低，出现脱落、开裂等现象。蜡还能降低沥青与基底材料的黏附性，在有水及动荷载的条件下，会使沥青路面中沥青从集料上剥落下来，造成结构溃散。此外，蜡还使沥青路面抗滑性能降低，影响行车安全。

不同使用环境下对于沥青含蜡量的限制有所不同，采用不同的测定方法也应选择不同的限值。通常沥青的含蜡量限制范围为 2%～4%，我国现行《重交通量道路用石油沥青技术要求》（JTJM0671052—2000）规定，利用蒸馏法所测沥青的含蜡量不得大于 3%。

7．溶解度

工程实际中通常不进行沥青的化学组分分析，一般仅规定其在有机溶剂（三氯乙烯）中的溶解度，以确定沥青中含有对工程有用成分的含量。

8．安全性

沥青材料在使用时需要加热，当加热到一定温度时，它所挥发的油分蒸气便与周围的空

气组成混合气体，此混合气体遇火则易发生闪火或燃烧，由此引起火灾。为确保沥青在使用中的安全，规定沥青加热时不得超过闪火的温度（称为闪点），更不得达到燃烧的温度（称为燃点）。为此，沥青在使用前应检测其闪点和燃点，以便指导施工。

我国现行标准规定，对黏稠石油沥青采用克利夫兰开口杯法（GB/T 267—94 或 JTJ 052T0611—2000）测定闪点和燃点。对液体石油沥青，采用泰格式开口杯测定闪点和燃点。沥青闪点和燃点的试验方法，是将沥青试样放入标准杯中，按规定加热速度进行加热。当加热到某一温度时，点火器扫过沥青试样任何一部分表面，出现一瞬即灭的蓝色火焰状闪光时的温度即为闪火点（即闪点）。按规定加热速度继续加热，至达点火器扫过沥青试样表面发生燃烧火焰，并持续 5 s 以上，此时的温度即为燃烧点（即燃点）。

四、石油沥青的技术标准与选用

依据黏稠石油沥青的用途不同可分为道路石油沥青和建筑石油沥青，鉴于其应用环境与使用条件的差别，分别制定了不同的技术标准。目前我国对建筑石油沥青执行同一技术标准，而道路石油沥青应按其道路的等级分别执行《中、轻交通量道路石油沥青技术标准》和《重交通量道路石油沥青技术标准》等标准。

1．建筑石油沥青的标准与选用

考虑建筑石油沥青的使用环境，国家标准依据其针入度（黏滞性）值等指标划分为 40 号、30 号和 10 号 3 个牌号。牌号较低的沥青针入度较小、延伸度较小，但其软化点较高。土木工程中建筑石油沥青主要用于各种屋面、地下防水及各种构造物的防水、各种设备、材料与管道的防腐等，它还是用于制作各种防水卷材、防水涂料和防水嵌缝材料的主要原料。

在屋面防水工程中，建筑沥青防水层的沥青胶膜较厚，对温度的敏感性较强，沥青表面又是较强的吸热体，一般同一地区沥青屋面的表面温度可比当地最高气温高 25～30 ℃。为避免夏季流淌，屋面防水用沥青材料的软化点应比本地区屋面最高温度高 20 ℃以上。当软化点偏低时，在夏季高温时沥青容易流淌；而软化点过高时，在冬季低温时沥青易产生硬脆甚至开裂。因此，选用石油沥青时要考虑地区、使用环境及要求等因素。有关建筑石油沥青的技术标准要求应符合 GB/T494—1998 的规定，见表 7－2。

建筑石油沥青技术标准 **表 7－2**

项　目		质量指标			试验方法
		10 号	30 号	40 号	
针入度（25 ℃，100 g）	(1/10 mm)	10～25	26～35	36～50	GB/T 4509
延度（25 ℃）	(cm) 不小于	1.5	2.5	3.5	GB/T 4508
软化点（环球法）	(℃) 不低于	95	75	60	GB/T 4507
溶解度（三氯甲烷、三氯乙烯、四氯化碳或苯）	(%) 不小于	99.5			GB/T 11148
蒸发损失（160 ℃，5 h）	(%) 不小于	1			GB/T 111964
蒸发后针入度比	(%) 不小于	65			注
闪点　（开口）	(℃) 不低于	230			GB/T 267
脆点	(℃)	报告			GB/T 4510

注：测定蒸发损失后样品的针入度与原针入度之百分比，称为蒸发后针入度比。

2．道路石油沥青的标准与选用

a．中、轻交通量道路石油沥青标准

按其针入度值的大小，用于中、轻交通量道路的石油沥青可划分为A—60，A—100，A—140，A—180和A—200号等5个牌号。根据其延度指标，其中A—60和A—100又划分为甲、乙两个副牌号。用于二级以下公路和城市次干路、支路路面的沥青，应满足中、轻交通量道路石油沥青的技术要求。此外，标准对其它指标也作了相应的规定，见表7－3。

中、轻交通量道路石油沥青技术要求 **表7－3**

序号	项目		沥青牌号							试验方法
			A—200	A—180	A—140	A—100甲	A—100乙	A—60甲	A—60乙	JTJ052
1	针入度（25℃，100 g，5 s）（单位1/10 mm）		201～300	161～200	121～160	81～120	81～120	41～80	41～80	T0604
2	延度（25℃，5 cm/min）（单位cm）不小于		—	100	100	80	60	60	40	T0605
3	软化点（环球法）（单位℃）不小于		30～45	25～45	38～40	42～52	42～52	45～55	45～55	T0606
4	溶解度（三氯乙烯）不小于（%）		99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	T0607
5	蒸发损失试验（163℃，15h）	质量损失（%）	1	1	1	1	1	1	1	T0608
		针入度比（%）	50	60	60	65	65	70	70	
6	闪点（COC）（单位℃），不小于		180	200	200，230	200	200	230	230	T0611

注：1．当25℃延度达不到100 cm时，如15℃延度不小于100 cm，也认为合格；

2．闪点（COC）为克利夫兰开口杯（Cleveland Open Cup）法。

b．重交通量道路石油沥青标准

高速公路、一级公路和城市快速路、主干路铺筑路面所用石油沥青的质量应满足重交通量道路沥青的技术要求。此类沥青按其针入度值划分为AH—50，AH—70，AH—90，AH—110和AH—130等5个牌号。除中、轻交通量道路石油沥青规定的有关指标外，重交通量道路石油沥青的延度试验温度要求为15℃，蒸发损失试验应改为薄膜烘箱试验，并引入含蜡量和密度两项指标，见表7－4。

重交通量道路石油沥青的技术要求　　表 7-4

序号	项　目	沥青牌号					试验方法
		AH—130	AH—110	AH—90	AH—70	AH—50	JTJ052
1	针入度（25 ℃，100 g，5 s）（单位 1/10 mm）	121～140	101～120	81～100	61～80	41～60	T0604
2	延度（15 ℃，5 cm/min）（单位 cm），大于	100	100	100	100	100	T0606
3	软化点（环球法）（单位℃）	38～48	40～50	42～52	44～54	45～55	T0606
4	闪点（COC）（单位℃）不低于	230	230	230	230	230	T0611
5	溶解度（三氯乙烯）大于（%）	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	T0607
6	含蜡量 W（蒸馏法）不大于（%）	3	3	3	3	3	T0615
7	密度（15 ℃）（单位 g/cm³）	实测记录					T0603
8	质量损失，不大于（%）	1.3	1.2	1.0	0.8	0.6	T0609 T0604 T0605
	加热后针入度比不小于（%）	45	48	50	55	58	
	加热后延度（25 ℃）不小于（cm）	75	75	75	50	40	
	加热后延度（15 ℃）不小于（cm）	实测记录					

c. 液体石油沥青的技术标准

液体石油沥青是指在常温下呈液体状态的沥青。它可以是油分含量较高的直馏沥青，也可以是将黏稠沥青用稀释剂稀释后的液体沥青。液体石油沥青中油分挥发速度的不同，其凝结速度快慢也不同。国标（GB 50092—96）规定，依据凝结速度的快慢，液体石油沥青可分为快凝 AL（R）、中凝 AL（M）和慢凝 AL（S）3 个等级。快凝液体沥青按黏度分为 AL（R）— 1 和 AL（R）— 2 两个牌号，中凝和慢凝液体沥青按黏度分为 AL（M）— 1～AL（M）— 6 和 AL（S）— 1～AL（S）— 6 等各 6 个牌号。其技术指标如表 7-5。其中除黏度的要求外，对不同温度的蒸馏馏分含量及残留物的性质，闪点和含水量等亦提出相应的要求。

液体石油沥青的技术要求　　表 7-5

项目		快凝			中凝					试验方法
		AL（R）-1	AL（R）-2	AL（M）-1	AL（M）-2	AL（M）-3	AL（M）-4	AL（M）-5	AL（M）6	JTJ052
黏度 S	C25，5	<20	—	<20	—	—	—	—	—	0621
	C60，5	—	5～15	—	5～15	16～25	26～40	41～100	101～200	
蒸馏体积不大于%	225℃前	>20	>15	<10	<7	<3	<2	0	0	T0632
	315℃前	>35	>30	<35	<25	<17	<14	<8	<5	
	360℃前	>45	>35	<50	<35	<30	<25	<20	<15	
蒸馏残余物性质	针入度	60～200	60～200	100～300	100～300	100～300	100～300	100～300	100～300	T0604
	延度≥	60	60	60	60	60	60	60	60	T0605
	浮标度	—	—	—	—	—	—	—	—	T0631
闪点（TOC）≥℃		30	30	65	65	65	65	65	65	T0633
含水量≤%		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	T0612

项目		慢凝						
		AL（S）-1	AL（S）-2	AL（S）-3	AL（S）-4	AL（S）-5	AL（S）-6	JTJ052
黏度 S	C25，5	<20	—	—	—	—	—	T0621
	C60，5	—	5～15	16～25	26～40	41～100	101～180	
蒸馏体积不大于%	225℃前	—	—	—	—	—	—	T0632
	315℃前	—	—	—	—	—	—	
	360℃前	<40	<35	<25	<20	<15	<5	
蒸馏残余物性质	针入度	—	—	—	—	—	—	T0604
	延度≥	—	—	—	—	—	—	T0605
	浮标度	<20	>20	>30	>40	>45	>50	T0631
闪点（TOC）≥℃		70	70	100	100	120	120	T0633
含水量≤%		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	T0612

注：1. 表中黏度是利用道路沥青黏度计测定，$C_{T,d}$的脚标第一个字符 T 表示温度（℃），第二个字符 d 表示孔径（mm）。

2. 闪点（TOC）为泰格开口杯（Tag Open Cup）法。

五、石油沥青的调配与改性

1. 沥青的调配

工程实际中，有时一种沥青难以满足某种技术指标的要求，这时可以利用两种或多种沥青按适当比例掺和在一起，掺和后的沥青可满足工程的技术要求，这种通过沥青的掺和而达到某种技术要求的方法就是沥青的调配。

例如现有 A、B 两种沥青，A 沥青的软化点为 t_1，低于工程所要求的软化点 t；B 沥青的软化点为 t_2，远高于工程所要求的软化点 t。如果欲获得软化点为 t 的沥青时，可以利用内插法求得 A 沥青在调配沥青中应占有的理论比例为：

$$P = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \times 100\%$$

相应的B沥青应占有的理论比例应为：$Q=1-P$

按照上述理论比例进行调配后混合沥青的软化点可能并不与 t 完全一致，但一般比较接近，当相差较多时可进行适当的调整即可满足工程要求。

当工程中要求的不是软化点，而是针入度或延度时，也可参照上述公式进行调配。值得指出的是，通过沥青的适当调配，除了可以满足要求的某一技术指标外，往往还可改善沥青的某些其它性能。因此，在某种意义上沥青的调配也是沥青改性的手段之一。

2．沥青的改性

许多工程中往往对沥青提出更高的技术指标要求，此时必须对基本石油沥青进行改性才能满足工程的需要，主要是改善沥青的流变性能，例如改善沥青的温度稳定性，或提高沥青的抗变形能力等。

对沥青进行改性的基本要求是，经过改性后沥青必须达到预期技术指标的要求，其它技术指标（特别是耐久性指标）也不得有明显的降低。为沥青改性所增加的费用不得太高，工程实际中经济可行。

沥青改性的主要途径是在基本沥青中通过适当的工艺均匀加入改性材料；加入的改性材料通常有树脂类高聚物、橡胶类高聚物、微细粉填料、纤维类填料、硫磷类改性剂等。目前应用较多、效果较好的高聚物类改性沥青有如下几种。

（1）橡胶改性沥青

石油沥青中加入适量天然橡胶（NR）、丁苯橡胶（SBR）、氯丁橡胶（CR）或聚异戊二烯橡胶（IR）等改性材料后，可不同程度地改善沥青的多种性能。如提高沥青的稠度、耐高温性和塑性变形能力，使所形成的沥青结构有更好的抗裂性能。由于上述不同品种的橡胶对沥青不同性能改性的效果有较大差别，工程实际中应针对要求的性能，并参考成本可行性选择合适的橡胶。

（2）热塑性弹性体（高聚物）改性沥青

为提高沥青的抗变形能力和温度稳定性，工程中常利用SBS等高聚物改善沥青的这些性能。SBS是由苯乙烯（Stren）和丁二烯（Butaeliene）聚合形成的线状或环状嵌段共聚物，在大量的这种共聚物聚集体中，由于S（苯乙烯）之间的相容性很好，而S与B（丁二烯）之间相容性很差，使得许多共聚物端点的S相互聚合形成熔点和强度均较高的聚苯乙烯聚集体；而与这些S相联的B嵌段在这些交联点之间构成了空间嵌段联系网，因为B（聚丁二烯）柔软且弹性很好，柔软的B嵌段在强度较高的S聚集体交联点之间起着空间联系作用，使这两种聚集体在空间上形成了网状的物理交联结构，即SBS嵌段共聚物。

基本沥青需要改善的主要工程性质是温度稳定性和抗变形能力，通常加入少量的SBS就可能达到很好的效果。在SBS结构中，S聚集体具有较高的玻璃化温度（80 ℃），在施工时将SBS加入热（170 ℃）的沥青中经过强制分散，S聚集体可被打散，SBS在常温下的网状结构被肢解，此时表现出沥青本身的高温流动性，这种状态适于各种施工或生产操作。当掺入SBS的沥青施工或生产完毕后，由于温度下降（80 ℃以下），促使S之间的相互聚集，使分散在沥青中的SBS自动形成网状物理交联结构，这种网状结构对于整个沥青结构就可产生一系列的改善效果。

经过SBS改性后的沥青在受到外力作用时会产生变形的趋势，此时的SBS网状结构也应产生局部受拉或变形的趋势，因为SBS网状结构有很高的抗拉强度，欲使其拉断必须施加更大的外力，所以它对沥青起到了很好的增强效果。

当受到高温（60℃左右）的作用时，虽然沥青本身的抗变形能力很差，但是SBS改性沥青塑性变形的前提是使其中的SBS网状结构产生破坏；而这种网状结构具有很高的抗拉强度，它限制了沥青的变形，从而使整个改性沥青结构表现为较高的抗变形能力。当SBS改性沥青结构处于低温环境时，由于其中的B（聚丁二烯）聚集体仍然有很好的变形能力，使SBS网状结构在低温下收缩时仍然保持完好的结构，其中沥青的变形因受到SBS网状结构的约束难以产生集中收缩，使得改性沥青结构在低温下不易开裂。

工程实践表明，沥青中掺加3%～15%的SBS可以显著改善其工程性质。例如可以使其黏度和软化点显著提高的同时，具有更好的变形能力和抗低温能力，还可明显改善沥青的耐久性。

第二节　沥青混合料

一、沥青混合料概述

1．沥青混合料的基本概念

沥青混合料是指沥青与适当级配的矿质混合料拌和而成的混合物，它是沥青混凝土混合料与沥青碎石混合料的总称。沥青与不同组成的矿质集料可以构成不同结构的沥青路面，以满足不同的工程要求。工程中最常用的沥青混合料主要有以下两类：

（1）沥青混凝土混合料

它是由适当比例的粗集料、细集料及填料与沥青在严格控制条件下拌和而成，压实后剩余空隙率小于10%的沥青混合料，简称沥青混凝土（可用AC或LH表示）。

（2）沥青碎石混合料

它是由适当比例的粗集料、细集料及少量填料（或不加填料）与沥青拌和而成，压实后剩余空隙率在10%以上的沥青混合料。简称沥青碎石（可用AM或LS表示）。此外，还有空隙率更高的开式沥青混合料。

2．沥青混合料的分类

（1）按结合料分类

以石油沥青或煤沥青为结合料的沥青混合料分别称为石油沥青混合料或煤沥青混合料。

（2）按沥青混合料拌制和摊铺时要求的温度分为：

a．热拌热铺沥青混合料：经预先加热至流动状态的沥青，与经加热干燥的矿料在热态下拌和，在热态下铺筑的沥青混合料。

b．常温沥青混合料：采用乳化沥青或稀释沥青与矿料在常温状态下拌制、在常温下铺筑的混合料。

（3）按矿质集料的级配类型分类

a．连续级配沥青混合料：沥青混合料中的矿料是按级配原则，从大到小各级粒径都有，且按比例相互搭配组成的混合料，称为连续级配混合料。由连续级配混合料与沥青拌和的混合料称为连续级配沥青混合料。

b．间断级配沥青混合料：当矿料级配组成中缺少一个或多个档次而形成的间断级配时，就称为间断级配矿质混合料。间断级配矿质混合料与沥青拌和后便是间断级配沥青混合料。

（4）按混合料密实度分类

a．密级配沥青混凝土混合料：各种料径的颗粒级配连续、相互嵌挤密实的矿料，与沥

青拌和而成，压实后剩余空隙率小于10%，剩余空隙率3%～6%（行人道路为2%～6%）的称为Ⅰ型密实式沥青混凝土混合料；剩余空隙率4%～10%的称为Ⅱ型半密实式沥青混凝土混合料。

b. 开级配沥青混合料：矿料级配主要由粗集料组成、细集料较少，矿料相互拨开，压实后剩余空隙率大于15%的沥青混合料，简称开式沥青混合料。

c. 半开级配沥青混合料：由适当比例的粗集料、细集料及少量填料（或不加填料）与沥青拌和而成，压实后剩余空隙率在10%～15%的沥青混合料，简称半开式沥青混合料。也称为沥青碎石混合料。

(5) 按最大粒径分类

沥青混凝土混合料的集料最大料径可分为下列4类：

a. 粗粒式沥青混合料：集料最大料径为26.5 mm或31.5 mm（圆孔筛30～40 mm）的沥青混合料。

b. 中粒式沥青混合料：集料最大粒径为16 mm或19 mm（圆孔筛20 mm或25 mm）的沥青混合料。

c. 细粒式沥青混合料：集料最大粒径为9.5 mm或13.2 mm（圆孔筛10 mm或15 mm）的沥青混合料。

d. 砂粒式沥青混合料：集料最大粒径等于或小于4.75 mm（圆孔筛5 mm）的沥青混合料。

沥青碎石混合料除上述4类外，尚有集料最大料径等于或大于37.5 mm（圆孔筛45 mm）的特粗式沥青碎石混合料。

热拌沥青混合料是沥青混合料中最典型的品种，其它各种沥青混合料均为由其发展而来的亚种，本节主要介绍它的组成结构、技术性质、组成材料和设计方法。

3. 沥青混合料在路面结构中的力学行为

路面沥青混合料在使用中可能遇到各种因素的破坏作用，就其力学因素来说主要有以下两方面。其一就是在较高使用温度下，沥青混合料路面因受车轮局部荷载而产生竖向或水平方向的剪力作用，可能造成过大的塑性变形引起路面的推挤等现象。其二就是在较低温度下，因体积收缩量超过了沥青混合料路面在此温度下的变形能力，导致路面的低温缩裂等现象。

从上述破坏现象可见，沥青混合料路面抵抗破坏的能力，主要是常温或较高温度下抵抗剪力荷载的能力和在较低温度下具有抵抗开裂的柔韧性；前者称为沥青混合料的抗剪强度，后者称为沥青混合料的低温抗裂性。

目前对沥青混合料的设计主要是要求沥青混合料在高温时必须具有一定的抗剪强度和抵抗变形的能力，而对低温开裂问题，目前还没有限制指标。

二、沥青混合料的组成结构

按照沥青-集料混合料的组成结构可分为下列3类：

1. 悬浮-密实结构

当采用连续型密级配矿质混合料与沥青组成的沥青混合料时，依据粒子干涉理论，为避免次级集料对前级集料密排的干涉，前级集料之间必须留出比次级集料粒径稍大的空隙供次级集料排布。按此组成的沥青混合料，经过多级密垛虽然可以获得很大的密实度，但是各级集料均为次级集料所隔开，不能直接靠拢而形成骨架，有如悬浮于次级集料及沥青胶浆之

间，其结构组成如图 7－2（a）。这种结构的沥青混合料，虽然黏聚力较高，但是内摩擦角较低。因此，其高温稳定性差。

2．骨架-空隙结构

当采用连续型开级配矿质混合料与沥青组成的沥青混合料时，粗集料所占的比例较高，细集料则很少，甚至没有。粗集料可以互相靠拢形成骨架；但由于细料过少，不足以填满粗集料之间的空隙，因此形成骨架－空隙结构，其结构组成见图 7－2（b）。这种结构的沥青混合料具有较高的内摩擦角，但黏聚力较低。

3．密实-骨架结构

当采用间断型密级配矿质混合料与沥青组成的沥青混合料时，由于这种矿质混合料断去了中间粒径的集料，较多的粗骨料可形成空间骨架，同时又有相当数量的细集料可填密骨架的空隙，其结构组成见图 7－2（c）。这种结构不仅具有较高的黏聚力，而且具有较高的内摩擦角。

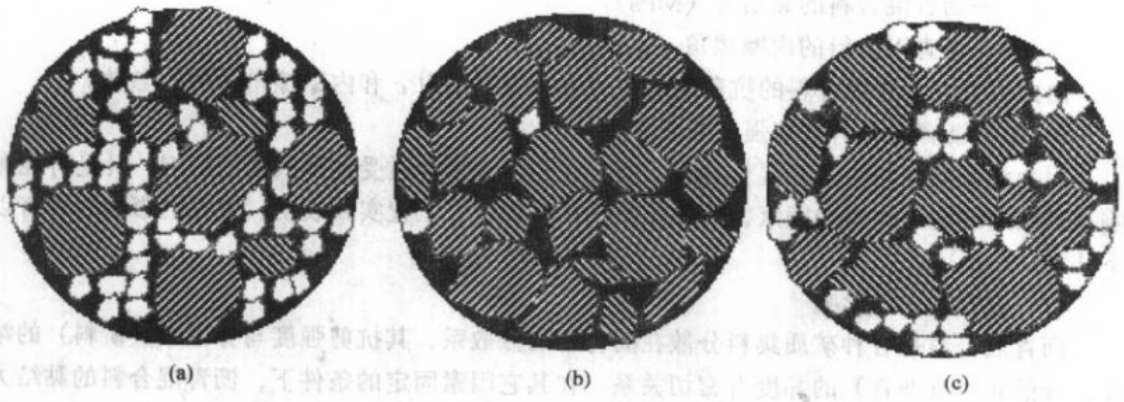


图 7－2　三种典型沥青混合料的结构组成示意图

（a）悬浮-密实结构；（b）骨架-空隙结构；（c）密实-骨架结构

由于结构组成不同，上述 3 种结构的沥青混合料所表现的结构常数和稳定性也具有显著的差异，相关结构和稳定性参数见表 7－6。

不同结构组成的沥青混合料的结构常数和稳定性　　表 7－6

混合料名称	组成结构类型	结构常数			稳定性指标	
		密度 ρ_0 (g/cm³)	空隙率 V_v (%)	矿料间隙率 VMA (%)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (rad)
连续型密级配沥青混合料	密实—悬浮结构	2.40	1.3	17.9	318	0.600
连续型开级配沥青混合料	骨架—空隙结构	2.37	6.1	16.2	240	0.653
间断型密级配沥青混合料	密实—骨架结构	2.43	2.7	14.8	338	0.658

三、沥青混合料的强度形成原理

1．沥青混合料抗剪强度的材料参数

为了防止沥青路面产生高温剪切破坏，在路面设计方法中，要求对沥青路面材料的抗剪强度进行验算，即要求沥青混合料的抗剪强度 τ_R 应大于沥青路面面层破裂面上可能产生的剪应力 τ_a。

$$\tau_a \leqslant \tau_R$$

其中的容许剪应力 τ_R 取决于沥青混合料的抗剪强度 τ，即

$$\tau_R = \tau / K$$

式中 K 为结构强度系数。

沥青混合料的抗剪强度，可通过三轴试验的方法测定，其强度值符合库伦定律：

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

式中 τ——沥青混合料的抗剪强度（MPa）；

σ——正应力（MPa）；

c——沥青混合料的黏结力（MPa）；

φ——沥青混合料的内摩擦角（rad）。

由此可见，沥青混合料的抗剪强度主要取决于黏结力 c 和内摩擦角 φ 两个参数。

2．影响沥青混合料抗剪强度的因素

因为沥青混合料为多相混合材料，而且它们的许多性质受各种因素的影响，凡是可能影响其黏结力或内摩擦角的因素，均可能影响抗剪强度。工程实践表明，常见的影响因素有以下几种。

（1）沥青黏度的影响

沥青混合料是各种矿质集料分散在沥青中的分散系，其抗剪强度与分散相（矿料）的浓度、分散介质（沥青）的黏度有密切关系。在其它因素固定的条件下，沥青混合料的黏结力是随着沥青黏度的提高而增加的，同时内摩擦角亦稍有提高。因此，沥青黏度较大时，混合料具有较高的抗剪强度。

（2）沥青与矿料化学性质的影响

试验研究结果表明：沥青与矿粉交互作用后，会在矿粉表面产生化学组分的重新排列，并在矿粉表面形成一层厚度为 δ_0 的扩散溶剂化膜，如图 7－3。在此膜厚度以内的沥青称为“结构沥青”，在此膜厚度以外的沥青称为“自由沥青”。如果矿粉颗粒之间接触处是由结构沥青膜所联结，这样促成沥青具有更高的黏度和更大的扩散溶化膜的接触面积，因而可以获得更大的黏聚力。反之，如果颗粒之间接触处主要靠自由沥青所联结，则其黏聚力较小。

沥青与矿料的相互作用不仅与沥青的化学性质有关，而且与矿料的化学性质有关。工程实践与研究结果表明，石油沥青与碱性石料间的黏聚力要比与酸性石料间的黏聚力大。

（3）矿料比表面积的影响

根据沥青与矿粉交互作用的原理，结构沥青的形成主要是由于矿料与沥青的交互作用，而引起沥青化学组分在矿料表面的重分布。在相同沥青用量的条件下，与沥青产生交互作用的矿料表面积越大，所形成的沥青膜越薄，结构沥青所占比例就越大，沥青混合料所表现的黏聚力也越高。工程实际中，通常以单位质量集料的总表面积来表示比表面积（简称“比表”）。矿料粒径越小，则其表面积越大，相应混合料的黏聚力也越高。为提高矿粉细度以增加矿粉比表面积，应对矿粉细度做相应的要求。工程实践表明，为获得较高的黏聚力，要求小于 0.075 mm 粒径的含量不要太少，但小于 0.005 mm 粒径部分的含量亦不宜过多，否则

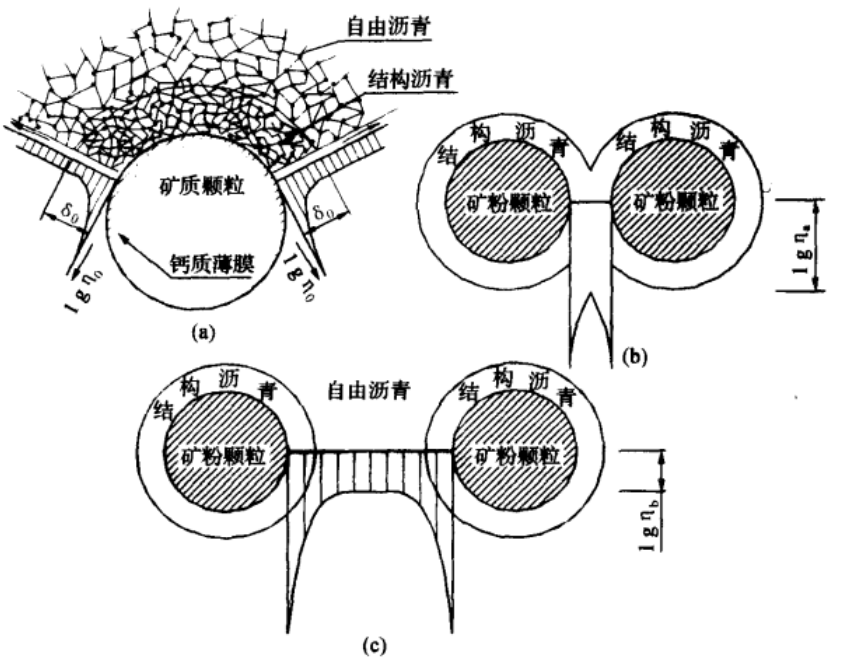


图 7-3 沥青与矿粉交互作用的结构示意图

(a) 沥青与矿粉交互作用形成结构沥青；

(b) 矿粉颗粒之间为结构沥青所联结，其黏聚力为 $\lg\eta_a$；

(c) 矿粉颗粒之间为自由沥青联结，其黏聚力为 $\lg\eta_b$。

将使沥青混合料结成团块，不易施工。

(4) 沥青用量的影响

沥青与矿料的比例也是影响沥青混合料抗剪强度的重要因素。在沥青用量较少时，沥青不足以形成结构沥青薄膜来黏结矿料颗粒，难以形成足够的黏聚力。此时，随着沥青用量的增加，结构沥青逐渐增多，混合料中沥青与矿料间总体黏结力增加，沥青混合料的抗剪强度相应增加。但是，沥青用量继续增加，当沥青用量过多时，颗粒间就会形成未与矿粉交互作用的“自由沥青”层，并逐渐将矿料颗粒推开。此时，沥青胶浆的黏聚力随着自由沥青的增加而降低。当沥青用量增加到某一用量后，沥青混合料的黏聚力大小主要取决于自由沥青的性能，此后再增加沥青用量，抗剪强度几乎不变。

由此可知，沥青在混合料中除起着黏结剂的作用外，还起润滑剂的作用，必须有适量的沥青才能保证混合料黏聚性，但过量的沥青会使得混合料的内摩擦角降低。因此只有在沥青用量适当的情况下，才能使沥青薄膜达到最佳厚度，沥青混合料具有最大的黏聚力。此时的沥青用量为最佳沥青用量。不同沥青用量时，沥青混合料 c，φ 值的变化如图 7-4。

(5) 矿质集料级配类型、粒度和表面性质的影响

沥青混合料的抗剪强度与矿质集料在沥青混合料中的分布情况有密切关系。矿料级配类型可以影响矿料的比表面积，因此影响沥青混合料的黏聚力。级配类型还可决定矿料之间的嵌挤锁结作用，从而影响内摩擦角值。此外，沥青混合料中矿质集料的粒度、形状和表面粗糙度对沥青混合料的抗剪强度都具有重要的影响。因为颗粒形状及其粗糙度在很大程度上将

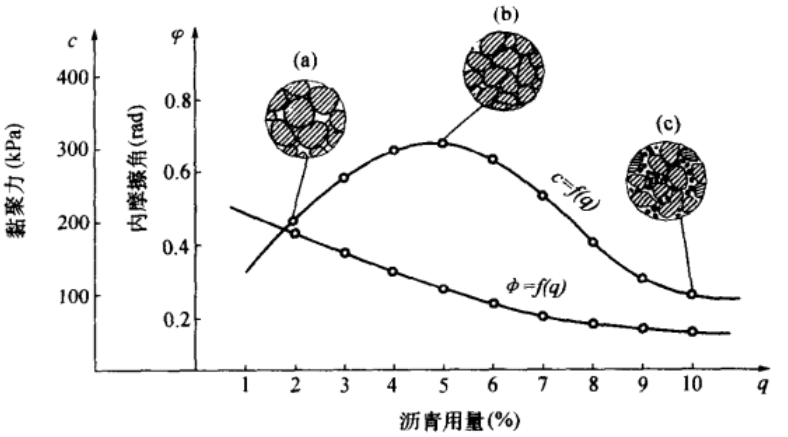


图 7-4　不同沥青用量时的沥青混合料结构和 c，φ 值变化示意图

(a) 沥青用量不足；(b) 沥青用量适中；(c) 沥青用量过多

决定压实后颗粒间相互位置的特性和颗粒接触有效面积的大小。

矿料表面越粗糙，矿料与沥青之间黏聚力就越大。矿料颗粒有棱角，各方向尺寸相差不大，近似正立方体，且表面粗糙时，所配制的混合料在碾压后容易相互嵌挤锁结，且有较大的内摩擦角。在其它条件相同的情况下，这种矿料所组成的沥青混合料较之圆形而表面光滑的矿料颗粒具有较高的抗剪强度。试验研究表明，要想获得具有较大内摩擦角的矿质混合料，必须采用粗大、均匀的颗粒。矿料颗粒越粗，所配制成的沥青混合料就具有越高的内摩擦角。在集料粒径组成相同的情况下，卵石的内摩擦角较碎石为低。

上述五类因素主要与材料组成有关，它们是影响沥青混合料抗剪强度的内在因素，因此也是在进行沥青混合料选材和组成设计时需要考虑的重点因素。此外，外界条件也会影响沥青混合料的抗剪强度。

(6) 温度的影响

沥青混合料是一种热塑性材料，其黏聚力 c 值会随着温度的升高而显著降低，因此其抗剪强度（τ）会随着温度（T）的升高而降低。实际上，温度对沥青混合料内摩擦角 φ 的影响较小，而对沥青混合料黏聚力 c 的影响更大。关于沥青混合料温度对黏聚力和内摩擦角影响的变化规律如图 7-5。

(7) 形变速率的影响

常温下沥青混合料又是一种黏-弹性材料，其抗剪强度（τ）与形变速率（$\mathrm{d}\gamma/\mathrm{d}t$）有密切的关系。试验研究结果表明，在其它条件相同的情况下，形变速率对沥青混合料的内摩擦角（φ）影响较小，而对黏聚力（c）影响则较为明显，沥青混合料的黏聚力 c 值会随形变速率增加而显著降低。

四、沥青混合料的技术性质

路面中的沥青混合料，直接承受各种交通荷载的反复作用，还要抵御各种自然因素的作用和影响。为长期持久地保持良好的路面状况，保证车辆行驶的快速、舒适和安全，沥青混合料必须满足一定的技术要求。

1. 高温稳定性

常温下的沥青混合料是一种流变性材料，其抗剪强度会随着温度的升高而降低，因此，

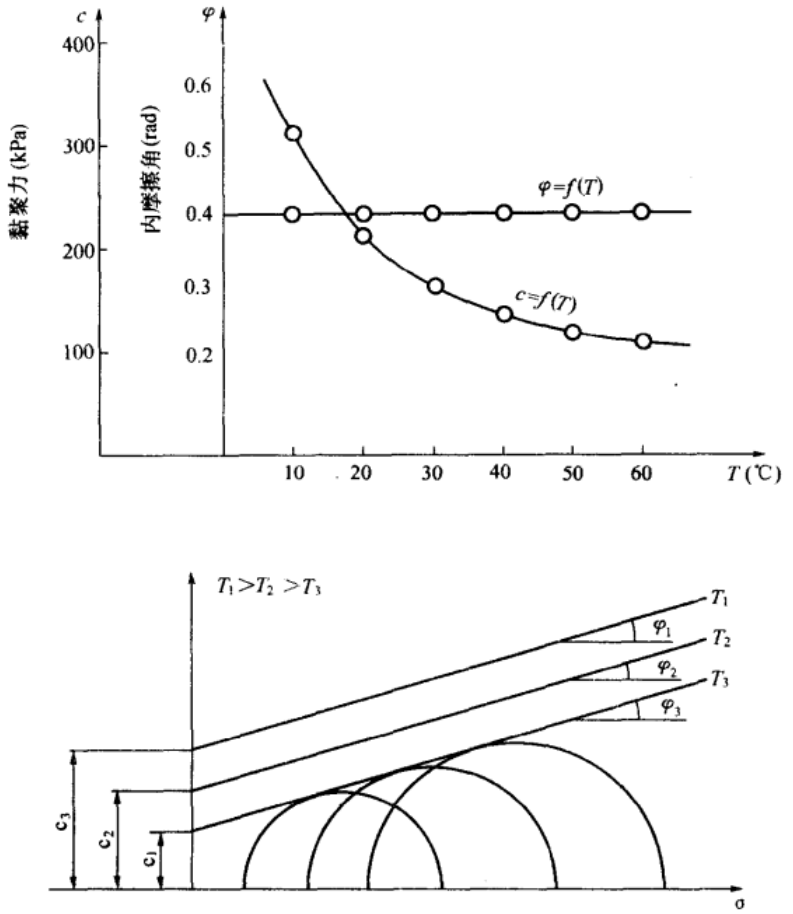


图 7-5　温度对沥青混合料黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值的影响

沥青路面在夏季高温时可能因承受不了车轮的重复作用而出现车辙。

沥青混合料的高温稳定性，就是指在夏季高温（通常取 60 ℃）条件下，经车辆荷载反复作用后，路面沥青混合料不产生车辙和波浪等病害的性能。

目前，评价沥青混合料高温稳定性的方法主要有：三轴试验、马歇尔稳定度（Marshall stability）、车辙试验（即动稳定度 DS）等方法。因为三轴试验较为复杂，所以马歇尔稳定度和车辙试验已成为国际上较通用的方法。近年来，由于流变学在沥青混合料研究中应用的发展，开始采用蠕变、劲度等原理来研究沥青混合料的高温稳定性。此外，有条件时还可以应用室内大型环道试验或路面加速加载试验等方法来评价沥青混合料的抗车辙能力。

我国现行国标（GB 50092—96）规定，对于各种沥青混合料路面应采用马歇尔稳定度试验来评价沥青混合料的高温稳定性。对于高速公路、一级公路和城市快速路、主干路沥青路面的上面层和中面层的沥青混合料，还应通过车辙（动稳定度）试验来检验其抗车辙能力。

（1）马歇尔稳定度

马歇尔稳定度试验主要测定的指标有：反映沥青混合料抵抗荷载能力的马歇尔稳定度（*MS*）、反映沥青混合料在外力作用下变形能力的流值（*FL*）。马歇尔稳定度是指在规定的

温度和加荷速度下，标准尺寸的试件在马歇尔试验仪中的最大破坏荷载（kN）；流值则是达到最大破坏荷载时试件的垂直变形值（以 0.1 mm 计）。

（2）车辙试验

目前对于沥青混合料车辙试验的方法，是用标准方法成型制成 300 mm×300 mm×50 mm 的沥青混合料试件，在 60 ℃（根据需要，在寒冷地区也可采用 45 ℃或其它温度）的温度条件下，以一定荷载的橡胶轮（轮压为 0.7 MPa）在同一轨迹上做一定时间的反复行走，测定其在变形稳定期每增加变形 1 mm 的碾压次数，即动稳定度，并以次/mm 表示（有关详细内容见试验部分）。

$$DS = \frac{(t_2 - t_1)}{d_2 - d_1} N \times c_1 \times c_2$$

式中 DS——沥青混合料的动稳定度（次/mm）；

d_1—— 时间 t_1（一般为 45 min）的变形量（mm）；

d_2——时间 t_2（一般为 60 min）的变形量（mm）；

N——每分钟行走次数（次/min）；

c_1、c_2——试验机及试样修正系数。

国家标准规定：用于高速公路、一级公路上面层或中面层的沥青混凝土混合料的动稳定度不宜小于 800 次/mm，对用于城市主干道的沥青混合料的动稳定度也不宜小于 600 次/mm。

2. 低温抗裂性

沥青路面在冬季低温时的破坏，主要是低温收缩开裂，为防止这种开裂，要求沥青混合料必须具有足够高的低温抗裂性。科学研究中通常采用的方法，是测定沥青混合料的低温劲度和温度收缩系数，计算低温收缩时在路面中所出现的温度应力与沥青混合料的抗拉强度对比，来预估沥青路面的开裂温度。工程实际中可以根据试件的低温劈裂试验结果间接评定其抗低温能力。

3. 耐久性

为保证沥青路面具有较长的使用年限，沥青混合料应具有较好的耐久性。影响沥青混合料耐久性的因素，除沥青的化学性质、矿料的组成外，沥青混合料的空隙率也是重要因素之一。空隙率的大小与矿料级配、沥青用量以及压实程度等有关。从耐久性的角度出发，沥青混合料的空隙率尽量减小，以防止水和阳光中紫外线对沥青的老化作用。但从沥青混合料的高温稳定性考虑，空隙率又应大些，以备夏季沥青材料受热膨胀时有一定的缓冲空间。一般沥青混凝土应留有 3%～10%的空隙率。

沥青混合料空隙率的大小还对其水稳性有影响。空隙率大且沥青与矿料黏附性差的沥青混合料，在饱水后石料与沥青黏附力会降低，使沥青易发生剥落，行车时易发生颗粒推移产生体积膨胀以及出现力学强度显著降低等现象，引起路面过早破坏。对于有些工程，必须进行浸水马歇尔试验或冻融劈裂试验来检验混合料的水稳定性。

此外，沥青用量与路面耐久性也有很大关系。沥青用量明显低于最佳用量时，沥青膜太薄，混合料的延伸能力降低，脆性增加。沥青用量过少还会使混合料空隙率增大，沥青膜暴露较多，加速沥青老化，并增加渗水率，加剧水对沥青的剥落作用。依据试验研究结论，沥青用量较最佳用量少 0.5%时，路面的使用寿命较最佳沥青用量时可能减少一半。

我国现行规范采用空隙率、饱和度和残留稳定度等指标来表征沥青混合料的耐久性。

4．抗滑性

为保证汽车安全和快速行驶，要求路面具有一定的抗滑性。沥青混合料路面的抗滑性主要与其矿质集料的表面状态和耐磨性、混合料的级配组成、沥青用量和沥青含蜡量等有关。

为满足路面对混合料抗滑性的要求，我国现行国标（GB 50092—96）对抗滑层集料提出了磨光值、道瑞磨耗值和冲击值等三项指标要求。沥青用量和含蜡量对抗滑性的影响非常敏感，即使沥青用量较最佳沥青用量只增加0.5%，也会使抗滑系数明显降低；沥青含蜡量对路面抗滑性的影响也十分显著，工程实际中应对沥青含蜡量严格控制。

5．施工和易性

就沥青混合料的材料性质而言，影响其施工和易性的因素主要是矿料级配。粗细集料的颗粒大小相距过大时，缺乏中间粒径，混合料容易离析。若细料太少，沥青层就不容易均匀地分布在粗颗粒表面；细料过多时，则拌和困难。当然混合料中沥青的黏度对施工和易性也有显著影响，可以通过控制混合料的温度来控制沥青的黏度。

五、热拌沥青混合料的技术标准

我国现行国标《沥青路面施工与验收规范》（GB 50092—96）对热拌沥青混合料的技术标准，主要是要求马歇尔试验的各项技术指标，其标准要求如表7－7。

热拌沥青混合料马歇尔试验技术标准（GB 50092—96）　　**表7－7**

项　目		沥青混合料类型	高速、一级公路、城市主干道	其它公路城市道路	人行道
击实次数		沥青混凝土、沥青碎石、抗滑表层	两面各75 >50	两面各50 两面各50	两面各35 两面各35
技术标准	1．稳定度 MS（kN）	Ⅰ型沥青混凝土 Ⅱ型沥青混凝土、抗滑表层	>7.5 >5.0	>5.0 >4.0	>3.0 —
	2．流值 FL（0.1 mm）	Ⅰ型沥青混凝土 Ⅱ型沥青混凝土、抗滑表层	20～40 20～40	20～45 20～45	20～50 —
	3．空隙率 VV（%）	Ⅰ型沥青混凝土 Ⅱ型沥青混凝土 Ⅲ型沥青混凝土、抗滑表层	3－6 4－10 >10	3－6 4－10 >10	2～5 — —
	4．沥青饱和度 VAF（%）	Ⅰ型沥青混凝土 Ⅱ型沥青混凝土、抗滑表层	70～85 60～75	70～85 60～75	75～90 —
	5．残留稳定度 MS_0（%）	Ⅰ型沥青混凝土 Ⅱ型沥青混凝土、抗滑表层	>75 >70	>75 >70	>75 —

注：1．粗粒式沥青混凝土的稳定度可降低1～1.5 kN；

2．Ⅰ型细粒式及砂粒式沥青混凝土的空隙率可放宽至12%～6%；

3．沥青混凝土混合料的矿料间隙率（VMA）宜符合下表要求：

集料最大粒径（mm）	37.5	31.5	26.5	19.5	16.0	13.2	9.5	4.75
VMA，不小于（%）	12	12.5	13	14	14.5	15	16	18

六、沥青混合料组成材料的技术性质

沥青混合料的技术性质决定于组成材料的性质、级配组成和混合料的制备工艺等因素，为保证沥青混合料的技术性质，首先应选择符合质量要求的材料。

1．对沥青的质量要求

沥青混合料用沥青应符合规范对沥青材料的要求。沥青作为结合料，对保证沥青混合料的黏结性、塑性和温度稳定性等具有关键作用。沥青混合料对沥青性能的要求还受路面所处条件的影响，如较炎热地区要求沥青有较高的稠度，以保证混合料具有较高的力学强度和稳定性；较低气温地区可选择较低稠度的沥青，以便冬季低温时有较好的变形能力，防止路面开裂。沥青面层所用的沥青标号及各项技术指标要求，宜根据地区气候条件、施工季节气温、路面类型、施工方法等按表7-3、7-4和表7-8选用，一般煤沥青不宜用于热拌沥青混合料路面的表面层。

热拌沥青混合料用沥青标号的选用（GB 50092—96）　　**表7-8**

气候分区	最低月平均气温（℃）	沥青标号	
		沥青碎石	沥青混凝土
寒区	低于-10	AH-90，AH-110，AH-130，A-100，A-140	AH-90，AH-110，AH-130，A-100，A-140
温区	0-10	AH-90，AH-110，A-100，A-140	AH-70，AH-90，A-60，A-100
热区	高于0	AH-50，AH-70，AH-90，A-100，A-60	AH-50，AH-70，A-60，A-100

2．对粗集料的要求

沥青混合料用粗集料是指粒径大于2.36 mm的碎石、破碎砾石和矿渣等。沥青混合料要求粗集料应该洁净、干燥、无风化、无杂质。在力学性质方面，其压碎值和磨耗率等指标应满足规范要求见表7-9。属于酸性岩石的石料与沥青的黏结性差，宜避免采用。若酸性石料用于高速公路、一级公路、城市快速路、主干路的路面时，应使用针入度较小的沥青，为保证与沥青的黏附性符合规范要求，还应采用下列抗剥离措施：

（1）用干燥的磨细消石灰、生石灰粉或水泥作为填料的一部分，改善沥青与石料的黏结性，其适宜用量为矿料总量的1%～2%。

（2）在沥青中掺加抗剥离剂。

（3）将粗集料用石灰浆处理后使用。

沥青面层用粗集料质量技术指标要求　　表 7－9

质量指标		高速公路、一级公路	其它等级公路
石料压碎值	不大于（%）	28	30
磨耗损失	不大于（%）	30	40
视密度	不小于（t/m^3）	2.50	2.45
吸水率	不大于（%）	2.0	3.0
对沥青的黏附性	不小于	4 级	3 级
坚固性	不大于（%）	12	—
细长扁平颗粒含量	不大于（%）	15	20
小于 0.075 mm 颗粒含量	不大于（%）	1	1
软石含量	不大于（%）	5	5
石料磨光值	不小于（BPN）	42	实测
石料冲击值	不大于（%）	28	实测
砾石破碎面积	不小于（%）	表面层 90	表面层 40
		中下面层 50	中下面层 40
		—	贯入式路面 40

注：坚固性试验根据需要进行，钢渣的游离氧化钙含量应不大于 3%，浸水后的体积膨胀率应不大于 2%。

3．对细集料的要求

沥青混合料用细集料是指粒径小于 2.36 mm 的天然砂、机制砂及石屑等。沥青混合料要求细集料应洁净、干燥、无风化、无杂质，并有适当的颗粒组成，其坚固性和颗粒级配等质量指标应符合规范中的有关要求见表 7－10 和表 7－11。细集料应与沥青有良好的黏结能力。与沥青黏结性能很差的天然砂、花岗岩、石英岩等酸性石料，破碎的机制砂或石屑不宜用于高速公路、一级公路、城市快速路、主干道路的沥青面层。必须使用时，也应采取抗剥离措施。

沥青面层用细集料质量技术要求　　表 7－10

指　标		高速公路、一级公路	其它等级公路
视密度	不小于（t/m^3）	2.50	2.45
坚固性（>0.3 mm 部分）	不大于（%）	12	—
砂当量	不小于（%）	50	40

注：砂当量是通过测定砂中所含黏性土或杂质的含量，以评定砂的洁净程度，可用 SE 表示。

沥青面层用天然砂颗粒级配要求　　表 7－11

方孔筛 (mm)	圆孔筛 (mm)	通过各筛孔的质量百分率（%）		
		粗　砂	中　砂	细　砂
9.5	10	100	100	100
4.75	5	90～100	90～100	90～100
2.36	2.5	65～95	75～100	85～100
1.18	1.25	35～65	50～90	75～100
0.6	0.63	15～29	30～59	60～84
0.3	0.315	5～20	8～30	15～45
0.15	0.16	0～10	0～10	0～10
0.075	0.08	0～5	0～5	0～5
细度模数 M_x		3.7～3.1	3.0～2.3	2.2～1.6

4．对填料的要求

在沥青混合料中起填充作用的粒径小于 0.075 mm 的矿质粉末称为填料。填料宜采用石灰岩或岩浆岩中的强基性岩石（憎水性石料）经磨细得到的矿粉，原石料中的泥土杂质应除净。要求矿粉干燥、洁净，质量符合表 7－12 的技术要求。当采用水泥、石灰、粉煤灰作填料时，其用量不宜超过矿料总量的 2%，并要求粉煤灰与沥青有良好的黏附性，烧失量小于 12%，塑性指数小于 4%。

沥青面层用矿粉质量技术要求　　表 7－12

指　标		高速公路、一级公路	其它等级公路
视密度	不小于（t/m^3）	2.50	2.45
含水量	不大于（%）	1	1
粒度范围	<0.6 mm（%）	100	100
	<0.15 mm（%）	90～100	90～100
	<0.075 mm（%）	75～100	70～100
外　观		无团粒结块	
亲水性系数		<1	

七、矿质混合料的组成设计方法

1. 级配曲线

各种不同粒径的矿质集料，按照一定的比例搭配起来可以形成不同的颗粒级配，为达到较高的密实度（或较大摩擦力），可以采用下列两种级配组成。

（1）连续级配

连续级配是指矿质混合料在标准筛孔配成的套筛中进行筛析时，所得的级配曲线平顺圆滑，具有连续的（不间断的）性质，相邻粒径的粒料之间，有一定的比例关系（按质量计），这种由大到小逐级配粒径均有，并按比例互相搭配组成的矿质混合料称为连续级配矿质混合料。

（2）间断级配

间断级配是在矿质混合料中缺少其一个（或几个）分级形成一种不连续的混合料。这种混合料称为间断级配矿质混合料。连续级配曲线和间断级配曲线如图 7-6 所示。

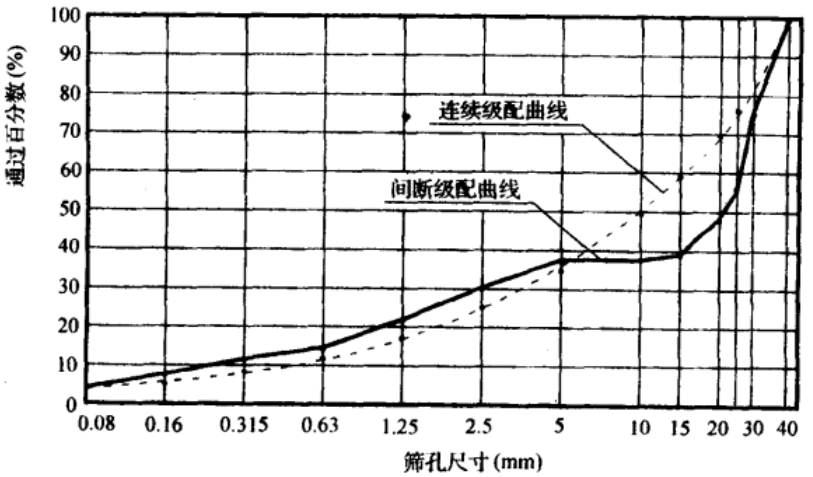


图 7-6 矿质混合料的连续级配和间断级配曲线

（3）合理级配范围曲线

为使沥青混合料获得较高的强度、良好的和易性和稳定性，所用矿质混合料应有较大的密度和较小的空隙率，但过低的空隙率难以保证沥青路面的高温稳定性。为满足沥青路面对矿质混合料密度和空隙率的要求进行了大量的理论和试验研究，总结出了富勒最大密度曲线理论和粒子干涉理论等级配理论。

按级配理论计算出各级集料在矿质混合料中的通过百分率，在以各级筛孔尺寸的对数为横坐标，通过百分率为纵坐标的坐标图上绘制成曲线，即为理论级配曲线。由于矿料在轧制过程中的不均匀性以及混合料配制时的误差等影响，使所配制的混合料往往不可能与理论级配完全相符合。因此，必须允许配料时的合成级配在适当的范围内波动，这就是“级配范围”。绘制曲线时通常用半对数坐标，即横坐标（即筛孔尺寸）采用对数坐标，而纵坐标用常坐标，见图 7-7。因为工程中可能采用方孔筛或圆孔筛，我国现行国标（GB 50092—96）规定，沥青路面集料的粒径选择和筛分以方孔筛为准。

此外，粗集料还应满足规范中面层沥青混合料对粗集料颗粒级配的要求见表 7-13。

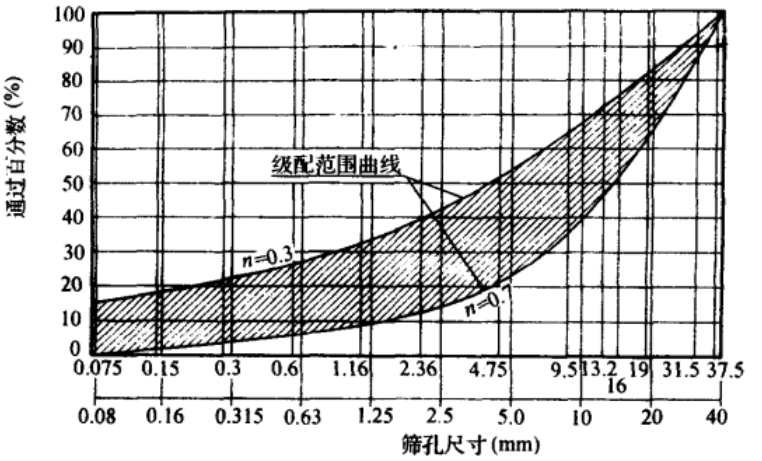


图 7－7　沥青路面用矿质混合料级配范围曲线

沥青面层用粗集料规格与级配范围　　表 7－13

规格	公称粒径 (mm)	通过下列尺寸（mm）方孔筛的质量百分率（%）												
		106	75	63	53	37.5	31.5	26.5	19.0	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6
S1	40～75	100	90～100	—	—	0～15	—	0～5	—	—	—	—	—	—
S2	40～60	—	100	90～100	—	0～15	—	0～5	—	—	—	—	—	—
S3	30～60	—	100	90～100	—	—	0～15	—	0～5	—	—	—	—	—
S4	25～50	—	—	100	90～100	—	—	0～15	—	0～5	—	—	—	—
S5	20～40	—	—	—	100	90～100	—	—	0～15	—	0～5	—	—	—
S6	15～30	—	—	—	—	100	90～100	—	—	0～15	—	0～5	—	—
S7	10～30	—	—	—	—	100	90～100	—	—	—	0～15	0～5	—	—
S8	15～25	—	—	—	—	—	100	95～100	—	0～5	—	0～5	—	—
S9	10～20	—	—	—	—	—	—	100	95～100	—	0～15	0～5	—	—
S10	10～15	—	—	—	—	—	—	—	100	95～100	0～15	0～5	—	—
S11	5～15	—	—	—	—	—	—	—	100	95～100	40～70	0～15	0～5	—
S12	5～10	—	—	—	—	—	—	—	—	100	95～100	0～10	0～5	—
S13	3～10	—	—	—	—	—	—	—	—	100	95～100	40～70	0～15	0～5
S14	3～5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85～100	0～25	0～5

2．矿质混合料的组成设计方法

通常天然或人工轧制的某一种集料的级配，难以完全符合沥青路面的级配要求，因此必须采用两种或两种以上的集料配合起来才能满足级配范围的要求。这种确定混合料中各种集料相对比例的过程就是矿质混合料的组成设计。矿质混合料组成设计的方法很多，但是归纳起来主要分为数解法与图解法两大类。

（1）数解法

用数解法设计矿质混合料的组成可采用多种方法，最常用的为“试算法”和“正规方程

法”（或称“线性规划法”）。前者简便快捷，较适用于3～4种矿料组成；后者可用于多种矿料组成，所得结果准确，但计算较繁杂，需借助于电算求解。

a. 试算法

试算法的基本原理是，设有几种矿质集料，欲配制某一种一定级配要求的混合料，在决定各组成集料在混合料中的比例时，先假定混合料中某种粒径的颗粒是由某一种对该粒径占优势的集料所组成，而其它集料不含这种粒径。如此根据各个主要粒径去试算各种集料在混合料中的大致比例。如果比例不合适，应继续调整，这样逐步渐进，最终达到符合混合料级配要求的集料配合比例。

设有 A、B、C 三种集料，欲配制成级配为 M 的矿质混合料，求各种集料在混合料中的比例（即配合比）。

按题意作下列两点假设：

设 A、B、C 三种集料在混合料 M 中的用量比例为 X、Y、Z，则

$$X + Y + Z = 100$$

又设混合料 M 中某一级粒径要求的含量为 $aM(i)$，A、B、C 三种集料在该粒径的含量为 $aA(i)$、$aB(i)$、$aC(i)$。则：

$$aA(i) \cdot X + aB(i) \cdot Y + aC(i) \cdot Z = aM(i)$$

在上述两点假设的前提下，按下列步骤求 A、B、C 三种集料在混合料中的用量。

①计算 A 料在矿质混合料中的用量：

在计算 A 料在混合料中的用量时，按A料在优势含量的某一粒径计算，而忽略其它集料在此粒径的含量。即：计算 A 料占优势粒径尺寸为 i（mm）的粒径含量 $aM(i)$ 时，则假设 B 料和 C 料在该粒径的含量 $aB(i)$ 和 $aC(i)$ 均等于零，由上式可得：

$$aA(i) \cdot X = aM(i)$$

即 A 料在混合料中的用量：

$$X = aM(i)/aA(i) \cdot 100$$

②计算 C 料在矿质混合料中的用量：

原理同前，在计算 C 料在混合料中的用量时，按 C 料占优势的某一粒径计算，而忽略其它集料在此粒径的含量。设按 C 粒径尺寸为 j（mm）的粒径来进行计算，则 A 料和 B 料在该粒径的含量 $aA(j)$ 和 $aB(j)$ 均等于零。由上式可得：

$$aC(j) \cdot Z = aM(j)$$

即 C 料在混合料中的用量：

$$Z = aM(j)/aC(j) \cdot 100$$

③计算 B 料在矿质混合料中的用量：

求得 A 料和 C 料在混合料中的含量 X 和 Z 后，可得：

$$Y = 100 - (X + Z)$$

如为四种集料配合时，C 料和 D 料仍可按其占优势粒级用试算法确定。

④校核调整：

按以上计算的配合比，经校核若不能满足级配范围的要求，应重新计算和复核，再次调整配合比。经几次调整，逐步渐进，直到符合要求为止。如经计算利用现有集料的确不能满足级配要求时，可掺加某些单粒级集料，或调换其它原始集料。

b. 正规方程法

多种集料采用数解法求算配合比，其基本原理是根据各种集料的筛分析数据和规范要求的级配中值，列出多元正规方程，然后用数学回归的方法或电算的方法求解，本节不作详细介绍。

（2）图解法

用图解法来确定矿质混合料组成的方法很多，本节仅介绍常用的“修正平衡面积法”（以下简称图解法）。

计算步骤如下：

a. 绘制级配曲线坐标图

在设计说明书上按规定尺寸绘一方形图框，通常纵坐标通过量取 10 cm，横坐标筛孔尺寸（或粒径）取 15 cm。连对角线 OO'（如图 7-8）作为要求级配曲线中值。纵坐标按算术标尺，标出通过量百分率（0～100%）。根据要求级配中值（如表 7-14）的各筛孔通过百分率标于纵坐标上，则纵坐标引水平线与对角线相交，再从交点做垂线与横坐标相交，其交点即为各相应筛孔尺寸的位置。

细粒式沥青混合料用矿料级配范围 **表 7-14**

筛孔尺寸（mm）	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围（mm）	100	95～100	70～88	48～68	36～53	24～41	18～30	12～22	8～16	4～8
级配中值（mm）	100	98	79	57	45	33	24	17	12	6

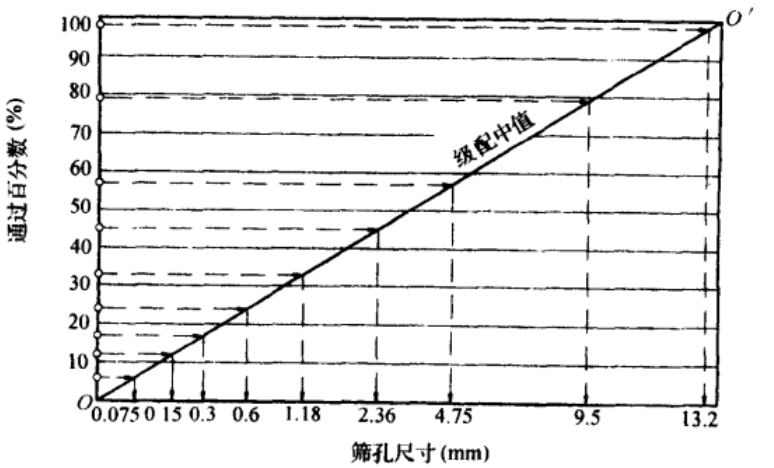


图 7-8 图解法级配曲线坐标图

b. 确定各种集料用量

将各种集料的通过量绘于曲线坐标图上（如图 7-9），实际集料的相邻级配曲线可能有三种情况，根据各集料之间的关系，可以根据不同的情况，按下述方法确定各种集料用量。

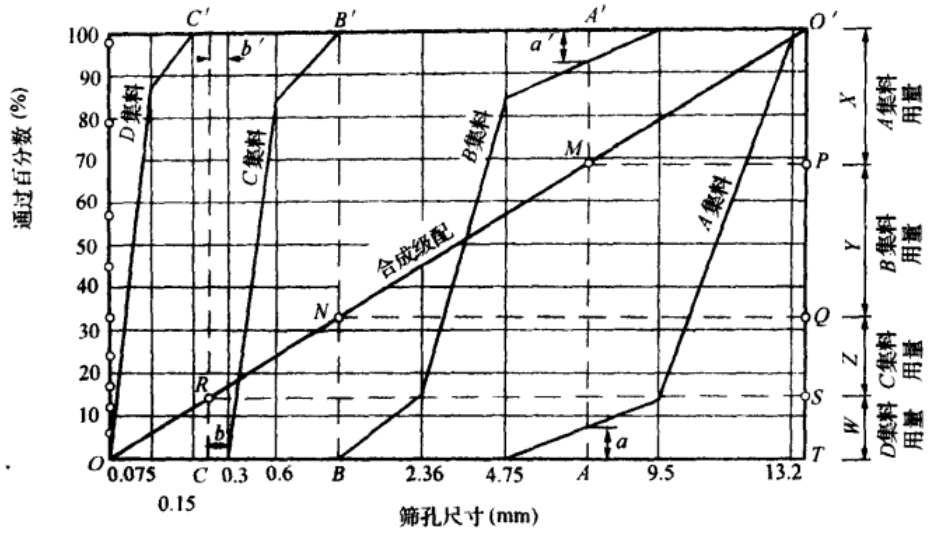


图 7-9　原始集料与欲合成的集料级配曲线图

两相邻曲线重叠：

若 A 集料的级配曲线下部与 B 集料级配曲线的上部搭接时，在两级配曲线之间引一条垂直于横坐标的直线（使 $a=a'$）AA'，AA' 与对角线 OO' 交于点 M，通过 M 作一水平线与纵坐标交于 P 点。$O'P$ 即为 A 集料的用量。

两相邻近级配曲线相接：

若 B 集料的级配曲线末端与 C 集料的级配曲线首端，正好在一垂直线上时，将前一集料曲线末端与后一集料曲线首端作垂线相联，垂线 BB' 与对角线 OO' 相交于点 N，通过 N 作一水平线与纵坐标交于 Q 点。PQ 即为集料 B 的用量。

两相邻级配曲线相离：

若 C 集料的级配曲线末端与 D 集料的级配曲线首端，在水平方向彼此离开一段距离时，作一垂直平分相离开的距离（使 $b=b$），垂线 CC' 与对角线 OO' 相交于点 R，通过 R 作一水平线与纵坐标交于 S 点，QS 即为 C 集料的用量。剩余的 ST 即为 D 集料用量。

校核：

按图解所得的各种集料用量比例，校核计算掺配后所得合成级配是否符合要求。如不符合要求（超出级配范围），应再调整各集料的用量，直到满足要求为止。

八、热拌沥青混合料配合比设计方法

热拌沥青混合料配合比设计就是确定沥青混合料的材料品种、矿料级配、矿料和沥青的用量。其总目标，就是确定一个经济合理的集料掺配比例和沥青含量。合理的沥青混合料配合比应满足以下要求：

（1）有适当的沥青含量以使矿质混合料得以充分黏结，并保证路面有良好的耐久性。

（2）经压实后有足够的稳定性，既能承受特定的交通荷载，又不致产生过大的变形或位移。

（3）混合料经压实后，应有足够的孔隙率，使其在荷载过大或温度较高时，不致产生冒油、泌油或丧失稳定性；同时孔隙率也不得过高，以防空气或水分的侵入。

(4) 应有足够的和易性，使混合料在施工时既容易摊铺，又不致产生分离现象。

沥青混合料配合比设计分三阶段进行：目标配合比（或试验室配合比）设计阶段，生产配合比设计阶段和生产配合比验证阶段。本节主要介绍目标配合比的设计过程。

沥青混合料的目标配合比设计主要分为两大部分，即矿质混合料的组成设计和根据马歇尔试验确定沥青最佳用量。

1. 矿质混合料的组成设计

(1) 首先应确定沥青混合料类型

不同类型的沥青混合料对矿质混合料的要求不同，因此首先应根据道路等级、路面类型、所处的结构层位等工程要求，选择相应的沥青混合料类型，见表 7-15。

不同路面结构的沥青混合料类型　　表 7-15

结构层次	高速公路、一级公路、城市快速路主干路		其它等级公路		一般城市道路及其它道路工程	
	三层式沥青混凝土路面	两层式沥青混凝土路面	沥青混凝土路面	沥青碎石路面	沥青混凝土路面	沥青碎石路面
上面层	AC-13 AC-16 AC-20	AC-13 AC-16	AC-13 AC-16	AC-13	AC-5 AC-10 AC-13	AM-5 AM-10
中面层	AC-20 AC-25	—	—	—	—	—
下面层	AC-25 AC-30	AC-20 AC-25 AC-30	AC-20 AC-25 AC-30 AM-25 AM-30	AM-25 AM-30	AC-20 AC-25 AM-25 AM-30	AC-25 AM-30 AM-40

(2) 确定矿料级配范围

根据已确定的混合料类型再确定相应的矿质混合料级配。规范推荐了适于不同类型混合料的矿质混合料级配范围，见表 7-16 。

(3) 矿料配合比计算

根据各组成材料的筛析试验资料，采用图解法或试算（电算）法，计算符合要求级配范围的各组成材料用量比例。合成级配应符合下列要求：

a. 应使包括 0.075 mm、2.36 mm、4.75 mm 筛孔在内的较多筛孔的通过量接近设计级配范围的中限。

b. 对交通量大、轴载重的公路宜偏向级配范围的下（粗）限。对中小交通量或人行道路等宜偏向级配范围的上（细）限。

合成的级配曲线应接近连续或有合理的间断级配，不得有过多的犬牙交错。当经过再三调整，仍有两个以上的筛孔超出级配范围时，必须调整或更换原材料，重新设计。

2. 马歇尔试验确定沥青最佳用量

沥青混合料的最佳沥青用量（Optimum asphalt content 简称 OAC）可以通过马歇尔试验法确定。其具体过程如下：

（1）制备试件

a. 根据已确定的矿质混合料配合比，计算各种矿质材料的用量。

b. 按表 7－16 推荐的沥青用量范围，并根据经验估计适宜的沥青用量（即沥青混合料中沥青质量与沥青混合料总质量的比例）或油石比（即沥青混合料中沥青质量与矿料质量的比例）。

c. 以估计沥青用量为中值，按 0.5%间隔变化，取 5 个不同的沥青用量，用小型拌和机与矿料拌和，按表 7－7 规定的击实次数成型马歇尔试件（直径为 101.6 mm，高为 63.5 mm的圆柱体）。

（2）测定试件的物理指标

为确定沥青混合料的沥青最佳用量，需测定沥青混合料的下列物理指标：

a. 视密度

沥青混合料压实试件的视密度，可以采用水中重法、表干法、体积法或蜡封法等方法测定。对于密级配沥青混合料，通常采用水中重法，按下式计算其视密度。

$$\rho_s = \frac{m_a}{m_a - m_w}\rho_w$$

式中 ρ_s——试件的视密度（g/cm^3）；

m_a——干燥试件的空中质量（g）；

m_w——试件的水中质量（g）；

ρ_w——常温水的密度（≈1 g/cm^3）。

b. 理论密度

沥青混合料试件的理论密度，是指压实沥青混合料试件全部为矿料（包括矿料内部孔隙）和沥青所组成的最大密度，也就是试件内部空隙率为零时的视密度。可按以下理论公式计算。

按油石比计算时：

$$\rho_t = \frac{100 + P_a}{\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{P_2}{\gamma_2} + \cdots\cdots + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_a}{\gamma_a}} \times \rho_w$$

按沥青用量计算时：

$$\rho_t = \frac{100}{\frac{P'_1}{\gamma_1} + \frac{P'_2}{\gamma^2} + \cdots\cdots + \frac{P'_n}{\gamma_n} + \frac{P_b}{\gamma_b}} \times \rho_w$$

式中 ρ_t——理论密度（g/cm^3）；

$P_1 \cdots\cdots P_n$——各种矿料的配合比（矿料总和为 100）；

$P_1' \cdots\cdots P_n'$——各种矿料的配合比（矿料与沥青之和为 100）；

$\gamma_1 \cdots\cdots \gamma_n$——各种矿料与水的相对密度；

P_a——油石比（%）；

P_b——沥青含量（%）；

沥青混合料矿级配和沥青用量范围 表 7-16

级配类型			通过下列筛孔(方孔筛,mm)的质量百分率(%)														沥青参考用量(%)	
			53.0	37.5	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
沥青混凝土	粗粒	AC-30 Ⅰ		100	90~100	79~92	66~82	59~77	52~72	43~63	32~52	25~42	18~32	13~25	8~18	5~13	3~7	4.0~6.0
		Ⅱ		100	90~100	65~85	52~70	45~65	38~58	30~50	18~38	12~28	8~20	4~14	3~11	2~7	1~5	3.0~5.0
		AC-25 Ⅰ			100	95~100	75~90	62~80	53~73	43~63	32~52	25~42	18~32	13~25	8~18	5~13	3~7	4.0~6.0
		Ⅱ			100	90~100	65~85	52~70	42~62	32~52	20~40	13~30	9~23	6~16	4~12	3~8	2~5	3.0~5.0
	中粒	AC-20 Ⅰ				100	95~100	75~90	62~80	52~72	38~58	28~46	20~34	15~27	10~20	6~14	4~8	4.0~6.0
		Ⅱ				100	90~100	65~85	52~70	40~60	25~45	16~33	11~25	7~18	4~13	3~9	2~5	3.5~5.5
		AC-16 Ⅰ					100	95~100	75~90	58~78	42~63	32~50	22~37	16~28	11~21	7~15	4~8	4.0~6.0
		Ⅱ					100	90~100	65~85	50~70	30~50	18~35	12~26	7~19	4~14	3~9	2~5	3.5~5.5
	细粒	AC-13 Ⅰ						100	95~100	70~88	48~68	36~53	24~41	18~30	12~22	8~16	4~8	4.5~6.5
		Ⅱ						100	90~100	60~80	34~52	22~38	14~28	8~20	5~14	3~10	2~6	4.0~6.0
		AC-10 Ⅰ							100	95~100	55~75	38~58	26~43	17~33	10~24	6~16	4~9	5.0~7.0
		Ⅱ							100	90~100	40~60	24~42	15~30	9~22	6~15	4~10	2~6	4.5~6.5
	砂粒	AC-5 Ⅰ								100	95~100	55~75	35~55	20~40	12~28	7~18	5~10	6.0~8.0
沥青碎石	特粗	AM-40	100	90~100	50~80	40~65	30~54	35~30	20~45	13~38	5~25	2~15	0~10	0~8	0~6	0~5	0~4	2.5~4.0
	粗粒	AM-30		100	90~100	50~80	38~65	32~57	25~50	17~42	8~30	2~20	0~15	0~10	0~8	0~5	0~4	2.5~4.0
		AM-25			100	90~100	50~80	43~73	38~65	25~55	10~32	2~20	0~14	0~10	0~8	0~6	0~5	3.0~4.5
	中粒	AM-20				100	90~100	60~85	50~75	40~65	15~40	5~22	2~16	1~12	0~10	0~8	0~5	3.0~4.5
		AM-16					100	90~100	60~85	45~68	18~42	6~26	3~18	1~14	0~10	0~8	0~5	3.0~4.5
	细粒	AM-13						100	90~100	50~80	20~45	8~28	4~20	2~16	0~10	0~8	0~6	3.0~4.5
		AM-10							100	85~100	35~65	10~35	5~22	2~16	0~12	0~9	0~6	3.0~4.5
抗滑表层	AK-13A							100	90~100	60~80	30~53	20~40	15~30	10~23	7~18	5~12	4~8	3.5~5.5
	AK-13B							100	85~100	50~70	18~40	10~30	8~22	5~12	3~12	3~9	2~6	3.5~5.5
	AK-16						100	90~100	60~82	45~70	25~45	15~35	10~25	8~18	6~13	4~10	3~7	3.5~5.5

γ_b——沥青的相对密度（25/25 ℃）。

c. 空隙率

压实沥青混合料试件的空隙率按下式计算：

$$VV = (1 - \rho_s/\rho_t) \times 100$$

式中 VV——试件的空隙率（%）；

ρ_s——试件的视密度（g/cm^3）；

ρ_t——试件的理论密度（g/cm^3）。

d. 沥青体积百分率

压实沥青混合料试件中，沥青的体积占试件总体积的百分率称为沥青体积百分率，按下式计算：

$$VA = \frac{P_b \times \rho_s}{\gamma_b \times \rho_w}$$

或

$$VA = \frac{P_a \times \rho_s}{(100 + P_a)\ \gamma_b \times \rho_w} \times 100$$

式中 VA——沥青混合料试件的沥青体积百分率（%）。

e. 矿料间隙率

压实沥青混合料试件内矿料部分以外的体积，占试件总体积的百分率，称为矿料间隙率。它也是试件空隙率与沥青体积百分率之和。

$$VMA = VA + VV$$

式中 VMA——矿料间隙率（%）。

f. 沥青饱和度

压实沥青混合料试件中沥青部分的体积，占矿料骨架以外的空隙部分体积的百分率，称为沥青饱和度，也称为沥青填隙率。

$$VFA = \frac{VA}{VA + VV} \times 100$$

式中 VFA——沥青混合料试件的沥青饱和度（%）。

(3) 测定力学指标

a. 马歇尔稳定度

按标准方法制备的试件，在 60 ℃的条件下，保温 30～40 min，然后将试件放置于马歇尔试验仪上（见试验部分），以 50 ± 5 mm/min 的形变速度加荷，直至试件破坏时的最大荷载（以 kN 计）称为马歇尔稳定度（简称 MS）。

b. 流值

在测定稳定度的同时，测定试件的流动变形，当达到最大荷载的瞬间，试件所产生的垂直流动变形（以 0.1 mm 计），称为流值（简称 FL）。

c. 马歇尔模数

通常用马歇尔稳定度（MS）与流值（FL）之比值表示沥青混合料的视劲度，称为马歇尔模数

$$T = \frac{MS \times 10}{FL}$$

式中 T——马歇尔模数(kN/ mm)。

(4) 马歇尔试验结果分析

a. 绘制沥青用量与物理—力学指标关系图，如图 7－10。

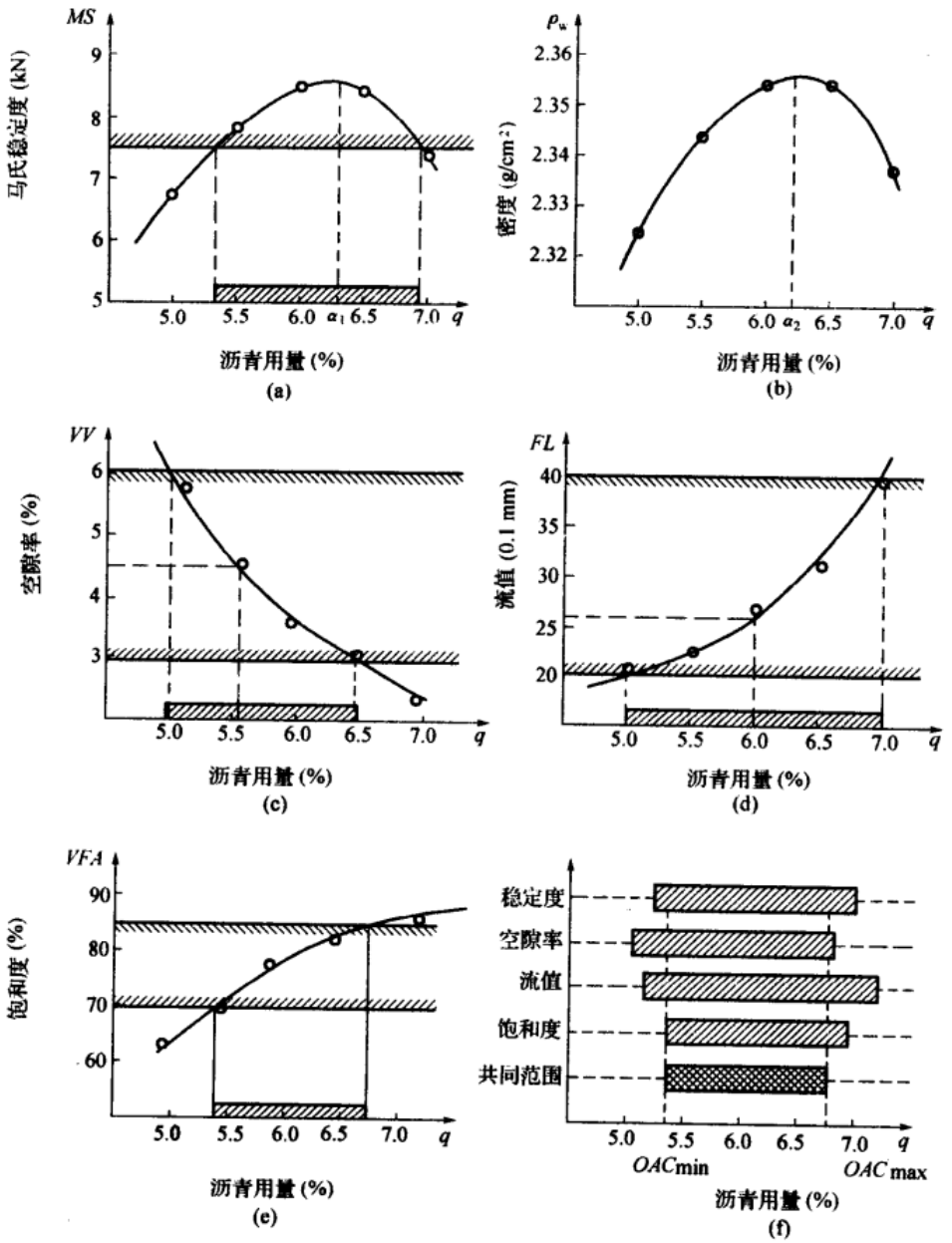


图 7－10　沥青用量与马歇尔试验各参数的关系分析图

b. 依据试验结果确定最佳沥青用量的初始值（OAC_1）

从图中取相应于密度最大值的沥青用量为 a_1，相应于稳定度最大值的沥青用量为 a_2 及相应于规定空隙率范围的中值（或要求的目标空隙率）的沥青用量为 a_3，取三者的平均值作为最佳沥青用量的初始值 OAC_1。即

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3)/3$$

c. 依据技术规范要求确定最佳沥青用量的初始值（OAC_2）

按图 7－10 求出各项指标均符合规范中沥青混合料技术标准的沥青用量范围 OAC_{min}～OAC_{max}，按下式取其中值 OAC_2。

$$OAC_2 = (OAC_{min} + OAC_{max}) /2$$

d. 根据 OAC_1 和 OAC_2 综合确定最佳沥青用量（OAC）

取最佳沥青用量初始值 OAC_1，在图中求取相应的各项指标值，检查其是否符合规范规定的马歇尔设计配合比技术标准，由 OAC_1 及 OAC_2 综合决定最佳沥青用量 OAC。当不符合时，应调整级配，重新进行配合比设计，直至各项指标均能符合要求为止。

e. 根据气候条件和交通量特性调整最佳沥青用量

由 OAC_1 及 OAC_2 综合决定最佳沥青用量 OAC 时，宜根据实践经验和道路等级、气候条件按下列步骤进行：

对炎热地区道路以及车辆渠化交通的高速公路、一级公路、城市快速路、主干路，预计有可能造成较大车辙的情况时，可在 OAC_2 与下限 OAC_{min} 范围内决定，但不宜小于 OAC_2 的 0.5%。

对寒冷地区道路以及一般道路，最佳沥青用量可以在 OAC_2 与上限值 OAC_{max} 范围内决定，但不宜大于 OAC_2 的 0.3%。

（5）水稳定性检验

按最佳沥青用量 OAC 制作马歇尔试件，进行浸水马歇尔试验或真空饱水后的浸水马歇尔试验。当残留稳定度不符合规范规定时，应重新进行配合比设计，或采用抗剥离措施后再进行试验。有时对低温地区，还应进行冻融劈裂试验，检验混合料的抗水损害能力。

当 OAC 与两个初始值 OAC_1、OAC_2 相差甚大时，宜按 OAC 与 OAC_1 或 OAC_2 分别制作试件，进行残留稳定度试验，根据试验结果对 OAC 作适当调整。

残留稳定度试验方法是标准试件在规定温度下浸水 48 h（或经真空饱水后，再浸水 48 h），测定其浸水残留稳定度，按下式计算：

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \times 100$$

式中 MS_0——试件的浸水残留稳定度（%）；

MS_1——试件浸水 48h（或真空饱水 48 h）后的残留稳定度（kN）。

（6）高温稳定性检验

按最佳沥青用量 OAC 制作车辙试验试件，在 60 ℃条件下用车辙试验机检验设计沥青用量的混合料高温抗车辙能力（即动稳定度）。当动稳定度不符合规范要求时，应重新进行配合比设计。当最佳沥青用量 OAC 与两个初始值 OAC_1、OAC_2 相差甚大时，宜按 OAC 与 OAC_1 或 OAC_2 分别制作试件，进行车辙试验。根据试验结果对 OAC 作适当调整。

我国现行国标《沥青路面施工及验收规范》（GB 50092—96）规定，用于上面层、中面层的沥青混凝土，在 60 ℃，轮压 0.7 MPa 条件下，进行车辙试验检验其动稳定度，对高速公路、城市快速道路应不小于 800 次/mm，对一级公路及城市主干路应不小于 600 次/mm。

3. 生产配合比设计阶段

以上决定的矿料级配及最佳沥青用量为目标配合比设计结果，对间歇式拌和机，必须从

二次筛分后进入各热料仓的材料中取样进行筛分，以确定各热料仓的材料比例，供拌和机控制室使用。同时反复调整冷料仓进料比例以达到供料均衡，并取目标配合比设计的最佳沥青用量，最佳沥青用量±0.3%等三个沥青用量进行马歇尔试验，确定生产配合比的最佳沥青用量。

4．生产配合比验证阶段

拌和机采用生产配合比进行试拌，铺筑试验段，并对拌和机中抽取的沥青混合料及路上钻取的芯样进行马歇尔试验检验，根据检验结果确定生产用的标准配合比。标准配合比应作为生产上控制的依据和质量检验的标准。标准配合比的矿料级配至少应包括0.075 mm、2.36 mm、4.75 mm三档的筛孔通过率，并要求它们接近要求级配的中值。

第八章　金属材料

金属材料包括黑色金属和有色金属两大类。黑色金属是指以铁元素为主要成分的金属及其合金，如钢和生铁。有色金属是指黑色金属以外的金属，如铝、铜、铅、锌等金属及其合金。

土木工程中应用量最大的金属材料是钢材，广泛应用于铁路、桥梁、建筑工程等各种结构工程中，在国民经济建设中发挥着重要作用。另外，铜、铝及其合金由于具有重量轻，可装配化生产等特点，在现代土木工程中的应用也很广泛。

第一节　土木工程钢材

土木工程钢材是指用于钢结构的各种型材（如圆钢、角钢、工字钢等）、钢板、管材和用于钢筋混凝土中的各种钢筋、钢丝等。

钢材具有良好的技术性质，能承受较大的弹塑性变形，加工性能好，因此在土木工程中被广泛采用。

一、钢材的分类及性能

将生铁在炼钢炉中冶炼，将含碳量降低到2%以下，并使其杂质控制在指定范围即得到钢。钢锭（或钢坯）经过压力加工（轧制、挤压、拉拔等）及相应的工艺处理后得到钢材。

1．钢材分类

钢按化学成分可分为碳素钢和合金钢两大类。

碳素钢中除铁和碳外，还含有在冶炼中难以除净的少量硅、锰、磷、硫、氧和氮等。其中磷、硫、氧、氮等对钢材性能产生不利影响，为有害杂质。

碳素钢根据含碳量可分为：低碳钢（含碳小于0.25%）、中碳钢（含碳0.25%～0.6%）、高碳钢（含碳大于0.6%）。

合金钢中含有一种或多种特意加入或超过碳素钢限量的化学元素如锰、硅、矾、钛等。这些元素称为合金元素。合金元素用于改善钢的性能，或者使其获得某些特殊性能。合金元素总含量小于5%为低合金钢；5%～10%为中合金钢；大于10%为高合金钢。

钢按用途分类可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢（如不锈钢、耐热钢、耐酸钢等）。

根据钢中有害杂质的多少，工业用钢还可分为普通钢、优质钢和高级优质钢。

土木工程中所使用的钢材大多为普通碳素结构钢的低碳钢和属普通钢一类的低合金结构钢。

2．钢材的力学性能

（1）抗拉性能

抗拉性能是钢材的最重要性能，也是工程设计和施工中最重要的技术指标。表征抗拉性能的技术指标是拉力试验测定的屈服点、抗拉强度和伸长率。低碳钢（软钢）受拉的应力-应变图能够较好地解释这些重要的技术指标，见图8-1。

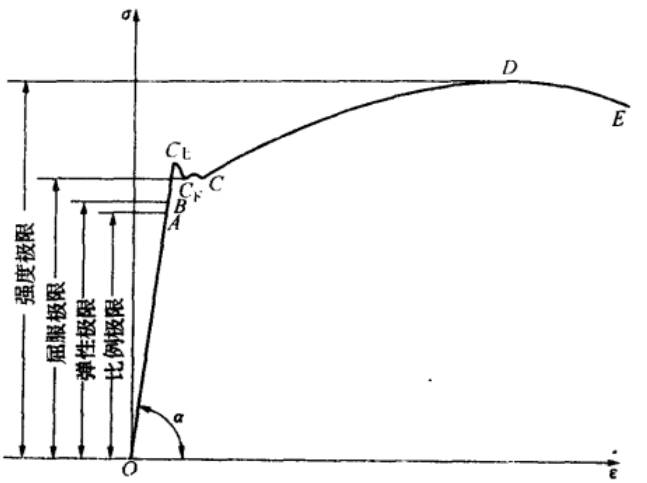


图 8-1　应力-应变图

a. 屈服点：当试件拉力在 OB 范围内时，如卸去拉力，试件能恢复原状，应力与应变的比值为常数，因此，该阶段被称为弹性阶段。当对试件的拉伸进入塑性变形的屈服阶段 BC 时，称屈服下限 $C_{下}$ 所对应的应力为屈服强度或屈服点，记做 σ_s。设计时一般以 σ_s 作为强度取值的依据。对屈服现象不明显的钢，规定以 0.2% 残余变形时对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服强度。

b. 抗拉强度：从图 8-1 中 CD 曲线逐步上升可以看出：试件在屈服阶段以后，其抵抗塑性变形的能力又重新提高，称为强化阶段。对应于最高点 D 的应力称为抗拉强度，用 σ_b 表示。

设计中抗拉强度虽然不能利用，但屈强比 σ_s/σ_b 具有一定意义。屈强比愈小，反映钢材受力超过屈服点工作时的可靠性愈大，因而结构的安全性愈高。但屈强比太小，则反映钢材不能有效地被利用。

c. 伸长率：图 8-1 中当曲线到达 D 点后，试件薄弱处急剧缩小，塑性变形迅速增加，产生“颈缩现象”而断裂。试件拉断后量出拉断后标距部分的长度 L_1，即可按下式计算伸长率 δ。

$$\delta=[(L_1-L_0)/L_0]\times 100\% \tag{8-1}$$

式中　L_0——试件的原标距长度（mm）。

伸长率表征了钢材的塑性变形能力。由于在塑性变形时颈缩处的伸长较大，故当原标距与试件的直径之比愈大，则颈缩处伸长值在整个伸长值中的比重愈小，因而计算的伸长率会小些。通常以 δ_5 和 δ_{10} 分别表示 $L_0=5d_0$ 和 $L_0=10d_0$（d_0 为试件直径）时的伸长率。对同一种钢材，δ_5 应大于 δ_{10}。

（2）冷弯性能

冷弯性能是指钢材在常温下承受弯曲变形的能力，是钢材的重要工艺性能。

冷弯性能指标是通过试件被弯曲的角度（90°、180°）及弯心直径 d 对试件厚度（或直径）a 的比值（d/a）区分的，见图 8-2。试件按规定的弯曲角和弯心直径进行试验，试件弯曲处的外表面无裂断、裂缝或起层，即认为冷弯性能合格。

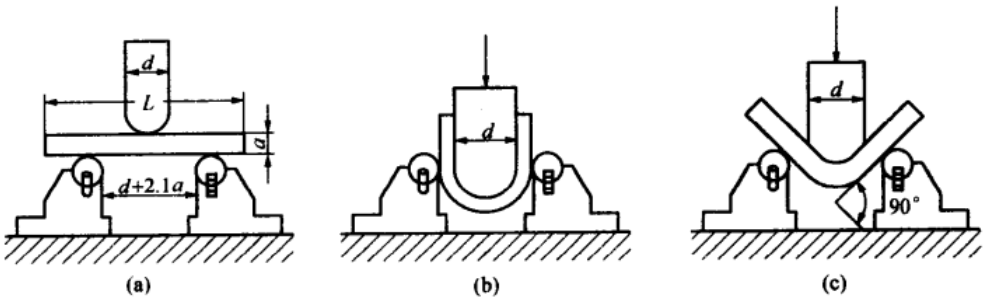


图 8－2　试件冷弯示意图

(a) 装好的试件；(b) 弯曲 180°；(c) 弯曲 90°

冷弯试验是通过试件弯曲处的塑性变形实现的，能揭示钢材是否存在内部组织不均匀、内应力和夹杂物等缺陷。在拉力试验中，这些缺陷常因塑性变形导致应力重分布而得不到反映。因此冷弯试验是一种比较严格的试验，对钢材的焊接质量也是一种严格的检验，能揭示焊件在受弯表面存在的裂纹和夹杂物。

(3) 冲击韧性

冲击韧性是指钢材抵抗冲击荷载的能力。冲击韧性指标是通过标准试件的弯曲冲击试验确定的，见图 8－3。以摆锤打击试件，于刻槽处将其打断，试件单位截面积上所消耗的功，即为钢材的冲击韧性指标，用冲击韧性 a_k(J/cm^2)表示。a_k 值愈大，冲击韧性愈好。

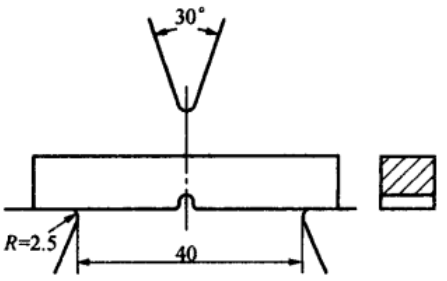


图 8－3　冲击韧性试验示意

钢材的化学成分、组织状态、内在缺陷及环境温度都会影响钢材的冲击韧性。试验表明，冲击韧性随温度的降低而下降，其规律是开始下降缓和，当达到一定温度范围时，突然下降很多而呈脆性，这种脆性称为钢材的冷脆性。发生冷脆时的温度称为临界温度，其数值愈低，说明钢材的低温冲击性能愈好。所以在负温下使用的结构，应当选用脆性临界温度较工作温度为低的钢材。

随时间的延长而表现出强度提高而塑性和冲击韧性下降的现象称为时效。完成时效变化的过程可达数十年，但是钢材如经受冷加工变形，或使用中经受振动和反复荷载的影响，时效可迅速发展。因时效而导致性能改变的程度称为时效敏感性，对于承受动荷载的结构应该选用时效敏感性小的钢材。

综上所述，许多因素都会降低钢材的冲击韧性，对于直接承受动荷载而且可能在负温下工作的重要结构，必须进行冲击韧性检验。

(4) 硬度

钢材的硬度是指其表面局部体积内抵抗外物压入产生塑性变形的能力。常用的测定硬度的方法有布式法和洛式法。

布氏法的测定原理是利用直径为 D (mm) 的淬火钢球，以 P (N) 的荷载将其压入试件表面，经规定的持续时间后卸除荷载，即得到直径为 d (mm) 的压痕，以压痕表面积

F（mm^2）除荷载 P，所得的应力值即为试件的布氏硬度值 HB，以数字表示，不带单位。图 8－4 为布式硬度测定示意图。布氏法比较准确，但压痕较大，不适宜成品检验。

洛氏法测定的原理与布氏法相似，但系根据压头压入试件的深度来表示硬度值，洛氏法压痕很小，常用于判定工件的热处理效果。

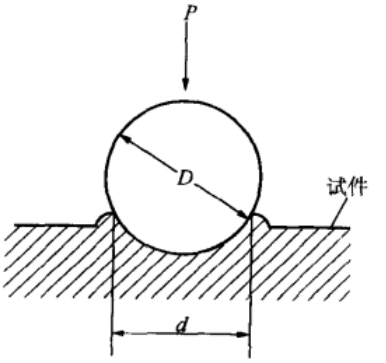


图 8－4　布氏硬度测定示意

（5）耐疲劳性

在反复荷载作用下的结构构件，钢材往往在应力远小于抗拉强度时发生断裂，这种现象称为钢材的疲劳破坏。疲劳破坏的危险应力用疲劳极限来表示，它是指疲劳试验中试件在交变应力作用下，于规定的周期基数内不发生断裂所能承受的最大应力。

一般认为，钢材的疲劳破坏是由拉应力引起的，因此，钢材的疲劳极限与其抗拉强度有关，一般抗拉强度高，其疲劳极限也较高。由于疲劳裂纹是在应力集中处形成和发展的，故钢材的疲劳极限不仅与其内部组织有关，也和表面质量有关。

设计承受反复荷载且须进行疲劳验算的结构时，应当了解所用钢材的疲劳极限。

（6）焊接性能

钢材的可焊性是指焊接后在焊缝处的性质与母材性质的一致程度。影响钢材可焊性的主要因素是化学成分及含量。如硫产生热脆性，使焊缝处产生硬脆及热裂纹。又如，含碳量超过 0.3%，可焊性显著下降等。

3. 钢材的化学成分及对性能的影响

钢材的化学成分主要是指碳、硅、锰、硫、磷等，在不同情况下往往还需考虑氧、氮及各种合金元素。

（1）碳：通常土木工程用钢材含碳量不大于 0.8%。在此范围内，随着钢中碳含量的提高，强度和硬度相应提高，而塑性和韧性则相应降低。碳还可显著降低钢材的可焊性，增加钢的冷脆性和时效敏感性，降低抗大气腐蚀性。

（2）硅：当硅在钢中的含量较低（小于 1%）时，可提高钢材的强度，而对塑性和韧性影响不明显。

（3）锰：锰是我国低合金结构钢的主要合金元素，锰含量一般在 1%～2% 范围内，它的作用主要是使强度提高。锰还能消减硫和氧引起的热脆性，使钢材的热加工性质改善。

（4）硫：硫是很有害元素，呈非金属硫化物夹杂物存在于钢中，具有强烈的偏析作用，降低各种机械性能。硫化物造成的低熔点使钢在焊接时易于产生热裂纹，显著降低可焊性。

（5）磷：它为有害元素。随着磷含量提高，钢材的强度提高，塑性和韧性显著下降，特别是温度愈低，对韧性和塑性的影响愈大。磷在钢中的偏析作用强烈，使钢材冷脆性增大，并显著降低钢材的可焊性。

磷可提高钢的耐磨性和耐腐蚀性。在低合金钢中可配合其它元素作为合金元素使用。

（6）氧：为有害元素。主要存在于非金属夹杂物内，可降低钢的机械性能，特别是韧性。氧有促进时效倾向的作用。氧化物造成的低熔点亦使钢的可焊性变差。

（7）氮：氮对钢材性质的影响与碳、磷相似，使钢材的强度提高，特别是使塑性和韧性显著下降。氮可加剧钢材的时效敏感性和冷脆性，降低可焊性。

在有铝、铌、钒等的配合下，氮可作为低合金钢的合金元素使用。

(8) 钛：钛是强脱氧剂。它能显著提高强度，改善韧性和可焊性，减少时效倾向，是常用的合金元素。

(9) 钒：钒是强的碳化物和氮化物形成的元素，能有效提高强度，减少时效倾向，并能增加焊接时的淬硬倾向。

(10) 铌：铌是强碳化物和氮化物形成的元素，也是一种常用的合金元素。

二、钢材的冷加工和热处理

1. 钢材的冷加工

钢材属晶体材料，晶体结构中各个原子是以金属键方式结合的。这种结合方式是钢材具备较高强度和良好塑性的根本原因。

钢材是有许多晶粒组成的（图 8-5）。各晶粒原子是规则排列的。描述原子在晶体中的空间格子称为晶格。晶格按原子排列的方式不同分为若干类型，例如纯铁在 910 ℃以下为体心立方晶格，称为 α-铁，其最小几何元素（晶胞）如图 8-6 所示。就每个晶粒来讲，其性质是各向不同的，但由于许多晶粒是不规则聚集的，故钢材是各向同性材料。钢材力学性能与晶体结构有密切关系。

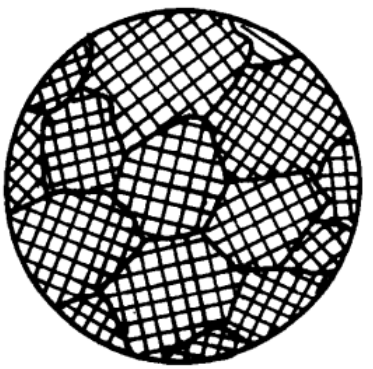


图 8-5 晶粒聚集示意图

将钢材在常温下进行冷拉、冷拔或冷轧，能使其产生塑性变形，从而提高屈服强度，这个过程称为冷加工强化处理。

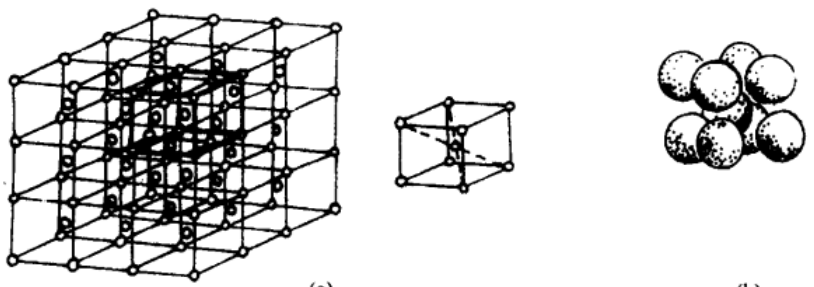


图 8-6 体心立方晶体铁原子排列示意

(a) 体心立方晶格；(b) 晶胞

冷加工强化的原理是：钢材在塑性变形中可使晶格的缺陷增多而使晶格严重畸变，这种畸变对晶格的进一步滑移将起到阻碍作用，故钢材的屈服点提高，塑性和韧性降低。由于塑性变形中产生了内应力，而使钢材的弹性模量 E（应力与应变的比值，反映钢材的刚性，即产生单位应变时所需应力的大小）降低。

工地或预制厂钢筋混凝土施工中常利用这一原理，对钢筋或低碳钢盘条按一定制度进行冷拉或冷拔加工，以提高屈服强度节约钢材。

将经过冷拉的钢筋于常温下存放 15～20 d；或加热到 100～200 ℃并保持一段时间。这个过程称为时效处理，前者称为自然时效，后者称为人工时效。

冷拉以后再经过时效处理的钢筋，其屈服点进一步提高，抗拉强度稍见增长，塑性继续

有所降低。由于时效过程中应力的消减，故弹性模量可基本恢复。

图 8-7 为拉力试验的应力-应变图。图中 O、B、C、D 为未经冷拉和时效试件的应力-应变曲线。将试件拉至超过屈服点的任一点 K，然后卸去荷载，在卸荷过程中，由于试件已产生塑性变形，故曲线沿 KO' 下降，KO' 大致与 BO 平行。如立即重新拉伸，则新的屈服点将高至原来达到的 K 点。以后的应力-应变关系将与原来曲线 KCD 相似。这表明：钢筋经冷拉以后，屈服点将提高。如在 K 点卸荷后，不立即拉伸，将试件进行自然时效或人工时效，然后再拉伸，则其屈服点将升高到 K_1 点。继续拉伸，曲线将沿 $K_1C_1D_1$ 发展。表明钢筋经冷拉时效以后，屈服点和抗拉强度都得到提高，塑性和韧性则相应降低。

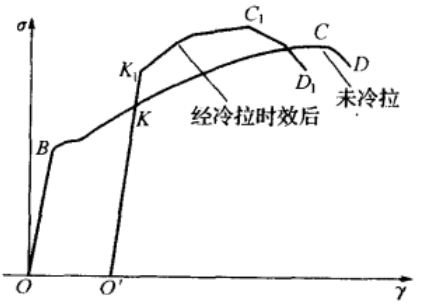


图 8-7 钢筋经冷拉时效后应力-应变图的变化

一般认为，产生应变时效的原因，主要是溶于 α-铁晶格中的碳、氮原子，有向缺陷移动、集中甚至呈碳化物或氮化物析出的倾向。当钢材在冷加工塑性变形以后，或者在使用中受到反复振动，则碳、氮原子的移动、集中可以大大加快，这将造成缺陷处碳、氮原子富集，使晶格畸变加剧，因而强度提高，塑性和韧性降低。

工程中，通常是通过试验选择恰当的冷拉应力和时效处理措施。一般强度较低的钢筋，采用自然时效即可达到时效目的，强度较高的钢筋，对自然时效几乎无反应，必须进行人工时效。

2. 钢材的热处理

热处理是将钢材按一定规则加热、保温和冷却，以改变其组织，从而获得需要性能的一种工艺过程。热处理的方法有退火、正火、淬火和回火。土木工程所用钢材一般只在生产厂进行热处理并以热处理状态供应。在施工现场，有时需对焊接件进行热处理。

退火：有低温退火和完全退火等。低温退火的加热温度在基本组织转变温度以下；完全退火的加热温度在 800～850 ℃。通过退火达到减少加工中产生的缺陷、减轻晶格畸变、消除内应力、从而达到改变组织并改善性能的目的。例如：含碳量较高的高强度钢筋焊接中容易形成很脆的组织，必须及时进行完全退火以消除这一不利的转变，保证焊接质量。

淬火和回火，通常是两道相连的处理过程。淬火的加热温度在基本组织转变温度以上，保温使组织完全转变，即投入选定的冷却介质（如水或矿物油等）中急冷，使转变为不稳定组织，淬火即完结。随后进行回火，加热温度在转变温度以下（150～650 ℃内选定）。保温后按一定速度冷却至室温。其目的是：促进不稳定组织转变为需要的组织；消除淬火产生的内应力。我国目前生产的热处理钢筋，即系采用中碳低合金钢是经油浴淬火和铅浴高温（500～650 ℃）回火制得的。

三、土木工程常用钢材

土木工程钢材可划分为钢结构用材和钢筋混凝土用材两大类。

1. 碳素结构钢

碳素结构钢指一般结构钢及工程用热轧板、管、带、型、棒材。国家标准《碳素结构钢》主要要求以下技术性能与指标。

（1）碳素结构钢的牌号及性能

碳素结构钢的牌号包括四个部分，依顺序为：屈服点字母（Q）、屈服点数值（单位为MPa）、质量等级（有A、B、C、D四级，逐级提高）和脱氧方法符号（F为脱氧不充分的沸腾钢，Z为脱氧充分的镇静钢，TZ为脱氧充分的特殊镇静钢，B为脱氧程度介于充分与不充分二者之间的半镇静钢。牌号表示时如遇Z、TZ可省略）。

例1：Q235—A·F：表示屈服点不低于235 MPa，A级沸腾钢。

例2：Q235—B：表示屈服点不低于235 MPa，B级镇静钢。

现行国家标准GB 700—88规定：碳素结构钢依据屈服点Q数值的大小被划分为五个牌号。依牌号升序，含碳量及抗拉强度增大，但冷弯性及伸长率却反向，即呈下降变化，见表8-1。

碳素结构钢的拉伸与冲击试验（GB 700—88） **表8-1**

牌号	等级	拉伸试验													冲击试验	
		屈服点 σ_s（MPa）						抗拉强度 σ_b MPa	伸长率 δ_5（%）						温度℃	V型冲击功（纵向）（J）
		钢材厚度（直径）（mm）							钢材厚度（直径）（mm）							
		≤16	>16～40	>40～60	>60～100	>100～150	>150		≤16	>16～40	>40～60	>60～100	>100～150	>150		
		不小于							不小于							不小于
Q195	—	(195)	(185)	—	—	—	—	315～390	33	32	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335～410	31	30	29	28	27	26	—	
	B														20	
Q235	A	235	225	215	205	195	185	375～460	26	25	24	23	22	21	—	
	B														20	
	C														0	
	D														-20	
Q255	A	255	245	235	225	215	205	410～510	24	23	22	21	20	19	—	
	B														20	
Q275	—	275	265	255	245	235	225	490～610	20	19	18	17	16	15	—	—

（2）碳素结构钢的技术要求

a. 化学成分。GB 700—88对碳素结构钢的化学成分，包括C、Si、Mn、S、P五大元素，按质量等级及脱氧方法，分别列出要求，见表8-2。

碳素结构钢的化学成分 **表8-2**

牌号	等级	化学成分（%）					脱氧方法
		C	Mn	Si	S	P	
				不大于			
Q195	—	0.06～0.12	0.25～0.50	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
Q215	A	0.09～0.15	0.25～0.55	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B				0.045		
Q235	A	0.14～0.22	0.30～0.65	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B	0.12～0.20	0.30～0.70		0.045		
	C	≤0.18	0.35～0.80		0.040	0.040	Z
	D	≤0.17			0.035	0.035	TZ

续表

牌号	等级	化学成分（%）					脱氧方法
		C	Mn	Si	S	P	
				不大于			
Q225	A	0.18－0.28	0.40－0.70	0.30	0.050	0.045	Z
	B				0.045		
Q275	—	0.28－0.38	0.50－0.80	0.35	0.050	0.045	Z

对于其它元素如 Cr、Ni、Cu，均要求各不大于 0.30%；A 级钢的 Cu 含量可不大于 0.35%。在保证力学性能符合标准规定的前提下，各牌号的 A 级钢中的 C、Si、Mn 含量，其它等级的 C、Mn 含量下限不做规定。

b. 力学性能。GB 700—88 关于碳素结构钢的力学性能的规定见表 8－1；对于冷弯试验，其规定见表 8－3。

碳素结构钢的冷弯性能 **表 8－3**

牌号	试样方向	冷弯试验 $B=2a$ 180°		
		钢材厚度（直径）(mm)		
		≤60	>60—100	>100—200
		弯心直径 d		
Q195	纵	0	—	—
	横	0.5a		
Q215	纵	3.5a	3.5a	2a
	横	a	2a	2.5a
Q235	纵	a	2a	2.2a
	横	1.5a	2.5a	3a
Q255		2a	3a	3.5a
Q275		3a	4a	4.5a

注：B 为试样宽度，a 为钢材厚度（直径）。

c. 冶炼方法。碳素结构钢有平炉、氧气转炉或电炉冶炼，电炉钢质地上乘但成本高；镇静钢优于沸腾钢。碳素结构钢一般以热轧状态交货。

对表面质量的要求：不得有裂纹、折叠、结疤、夹杂，端头不得有分层及缩孔痕迹等。

（3）碳素结构钢的选用

土木工程中主要应用的碳素结构钢是 Q235 号钢，可轧制各种型钢、钢板、钢管与钢筋。Q235 号钢具有较高的强度，良好的塑性与韧性，可焊性及可加工等综合性能好，且冶炼方便，成本较低，广泛用于一般钢结构。其中 C、D 级可用在重要的焊接结构 。

Q195、Q215 号钢材强度较低，但塑性、韧性较好，易于冷加工，可制作铆钉、钢筋等。Q255、Q275 号钢材强度高，但塑性、韧性、可焊性差，可用于钢筋混凝土配筋及钢结构中的构件及螺栓等。

选用钢材时，要根据结构的受荷情况（动荷载和静荷载）、连接方式（焊接或非焊接）及使用时的温度条件等，综合考虑钢材的牌号、质量等级、脱氧方法加以选择。如受动荷载、焊接结构、在低温情况下工作的结构，不能选用A、B质量等级及沸腾钢。

2．低合金结构钢

普通低合金结构钢一般是在普通碳素钢的基础上，少量添加若干合金元素而成，如硅、锰、钒、钛、铌等，加入这些合金元素可使这些钢的强度、耐腐蚀性、耐磨性、低温冲击韧性等得到显著提高和改善。

普通低合金结构钢在如下几方面具有突出的优点：

（1）强度较高，可以减少钢结构的自重，经济效益好。

（2）具有良好的综合性能，如耐腐蚀、耐低温性好，抗冲击性强，使用寿命长等。

（3）易于加工及施工，良好的可焊性及冷加工性能为施工提供了方便。

因此，在土木工程中普通低合金结构钢应用日益广泛，在诸如大跨度桥梁、大型柱网构架、电视塔、大型厅馆中成为主体结构材料。

另外，当低合金钢中的铬含量达11.5%时，铬就在合金金属的表面形成一层惰性的氧化铬膜，这时就成为不锈钢。不锈钢具有低的导热性和良好的耐蚀性能，但温度变化时膨胀性较大。

不锈钢可加工成板、管、型材、各种连接件等，表面可加工成无光泽的和高度抛光发亮的材料，既可作为建筑装饰材料也可作为承重构件。

低合金结构钢的现行国家标准是《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591—1994），共分为Q295、Q345、Q390、Q420、Q460五个牌号，其命名方法由代表屈服点的汉语拼音字母（Q）、屈服点数值、质量等级符号（A、B、C、D、E）三个部分按顺序排列。例如："Q295A"，Q为钢材屈服点的汉语拼音的首位字母；295表示屈服点的数值，单位MPa；A、B、C、D、E分别为质量强度等级。

低合金高强度结构钢的含碳量较低（例如Q295的碳含量到0.18%也可交货）是为了使钢材具有良好的加工性能（如可焊性等），强度的提高主要由添加合金元素来解决。表8-4列出了低合金结构钢机械性能指标，其数据摘自现行标准GB/T 1591—1994。

3．土木工程常用板、管、型材

（1）钢板

钢板按几何尺寸（厚度）划分为厚板、中板及薄板。

厚度在4 mm以上者为中厚板，是钢结构的主要用材。为热扎方式生产，材质按使用要求作相应选取。

厚度小于或等于4 mm的钢板称为薄钢板，用热轧或冷轧方式均可生产，冷轧钢板质量好，性能优，但成本高，故在土木工程中多使用热轧薄板。

（2）钢管

按照生产工艺，钢管分为无缝钢管与焊接钢管两大类。

焊接钢管采用优质带材焊接而成，表面镀锌或不镀锌（视使用而定）。按其焊缝形式有直纹焊管与螺纹焊管之分。焊管成本低，易加工，但在多数情况下抗压性能较差。

无缝钢管多采用热轧-冷拔联合工艺生产，也可用冷轧方式生产，但后者成本高昂。热轧无缝钢管具有良好的力学性能与工艺性能。在土木工程中无缝钢管主要用于压力管道，在一定特定的钢结构中，往往也设计使用无缝钢管。

低合金高强度结构钢的力学和工艺性能 **表 8-4**

牌号	质量等级	屈服强度 σ_s（MPa） 厚度（直径，边长）（mm） ≤16	>16~35	>35~50	>50~100	抗拉强度 σ_b（MPa）	伸长率 δ_5（%）	冲击功 A_kV（纵向）（J） +20℃	0℃	-20℃	-40℃	180°弯曲试验 d=弯芯直径 a=试样厚度 钢材厚度(直径)(mm) ≤16	>16~100
		不小于					不小于						
Q295	A	295	275	255	235	390~570	23					$d=2a$	$d=3a$
	B	295	275	255	235	390~570	23	34				$d=2a$	$d=3a$
Q345	A	345	325	295	275	470~630	21					$d=2a$	$d=3a$
	B	345	325	295	275	470~630	21	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	345	325	295	275	470~630	22		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	345	325	295	275	470~630	22			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	345	325	295	275	470~630	22				27	$d=2a$	$d=3a$
Q390	A	390	370	350	330	490~650	19					$d=2a$	$d=3a$
	B	390	370	350	330	490~650	19	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	390	370	350	330	490~650	20		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	390	370	350	330	490~650	20			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	390	370	350	330	490~650	20				27	$d=2a$	$d=3a$
Q420	A	420	400	380	360	520~680	18					$d=2a$	$d=3a$
	B	420	400	380	360	520~680	18	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	420	400	380	360	520~680	19		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	420	400	380	360	520~680	19			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	420	400	380	360	520~680	19				27	$d=2a$	$d=3a$
Q460	C	460	440	420	400	550~720	17		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	460	440	420	400	550~720	17			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	460	440	420	400	550~720	17				27	$d=2a$	$d=3a$

（3）型钢

在各种钢结构中，大量使用各种规格与型号的型钢。绝大部分型钢用热轧方式生产。较为常用的型钢有：角钢、槽钢、工字钢、H 型钢、扁钢及薄壁型钢等。

图 8-8 给出了三种常用型钢的部分名称，其规格表示方法见表 8-5。

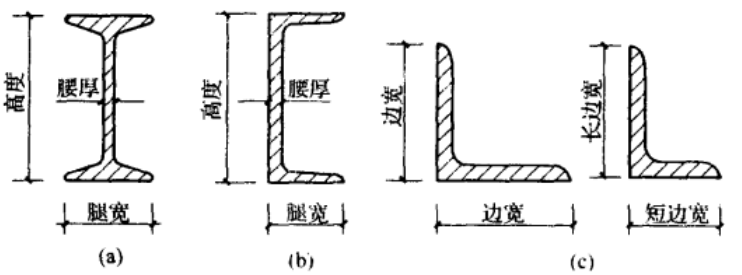


图 8-8 几种型钢部位名称示意图

（a）工字钢 （b）槽钢 （c）角钢

型钢规格表示方法　　表 8-5

名　称	工字钢	槽　钢	等边角钢	不等边角钢
表示方法	高度×腿宽×腰厚或型号	高度×腿宽×腰厚或型号	边宽²×边厚	长边宽度×短边宽度×边厚
表示方法举例	工 100×68×4.5 或工 10	[U100×48×5.3 或 [10	∟75²×10 或 ∟75×75×10	∟100×75×10

根据尺寸大小，型钢可划分为大型、中型及小型三类，见表 8-6。

型钢规格表示方法　　表 8-6

名　称	工字钢槽钢高度（mm）	角　钢		圆、方、六（八）角螺纹钢直径（mm）	扁钢宽（mm）
		等边边宽（mm）	不等边边宽（mm）		
大型型钢	≥180	≥150	≥100×150	≥81	≥101
中型型钢	<180	50～149	40×60～99×149	38～80	60～100
小型型钢		20～49	20×30～39×59	10～37	≤50

使用角钢、槽钢及工字钢等制作钢结构构件，采用的工艺方式主要有铆接和焊接两种。而在某些场合，可将大型槽钢、大型工字钢直接用做钢结构的构件，如梁、檩等。

4．钢筋

钢筋是土木工程中使用最多的钢材品种之一，其材质包括普通碳素钢和普通低合金钢两大类。钢筋按生产工艺、性能和用途等的不同可分为下列各类：

（1）热轧钢筋

热轧钢筋主要应用于钢筋混凝土结构中，分为热轧光圆钢筋和热轧带肋钢筋。

根据现行国家标准《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》（GB 13013—91）的规定，光圆钢筋是指横截面通常为圆形，表面为光滑的钢筋混凝土配筋用钢材。热轧光圆钢筋是指经热轧成型并自然冷却后的成品光圆直条钢筋。钢筋的长度一般为 3.5～12 m，公称直径为 8、10、12、16、20 mm 等几种。钢筋的化学成分、力学和工艺性能应符合表 8—7 的规定。

光圆钢筋的化学成分、力学及工艺性能　　表 8-7

表面形状	光圆	钢筋级别	Ⅰ	强度代号	R235
牌号	Q235	公称直径	8～20 mm		
化学成分	C			0.14～0.22	
	Si			0.12～0.30	
	Mn			0.30～0.65	
	P		不大于	0.045	
	S			0.050	
力学性能	屈服点 σ_s（MPa）		小于	235	
	抗拉屈服强度 σ_b（MPa）			370	
	伸长率 δ_5（%）			25	
工艺性能	冷弯　d=弯芯直径；a=钢筋公称直径			180°　$d=a$	

此外，钢筋混凝土结构中还经常使用低碳钢热轧圆盘条，其相应的国家标准为 GB/T 701—1997。盘条按用途可分为供拉丝用盘条（符号 L）和供建筑用以及其它一般用途用盘条（符号为 J）。其中供建筑用盘条的力学性能和工艺性能的要求见表 8－8。

盘条的力学性能和工艺性能 **表 8－8**

牌　号	力学性能			冷弯试验 180° d＝弯芯直径 a＝试样直径
	屈服点 σ_s（MPa）	抗拉强度 σ_b（MPa）	伸长率 δ_{10}（%）	
	不小于			
Q215	215	375	27	$d=0$
Q235	235	410	23	$d=0.5a$

热轧带肋钢筋是钢筋混凝土结构中使用的主要钢筋类别，由低合金钢轧制而成。横截面为圆形，外表带肋，长度方向有两条纵肋及均匀分布的月牙状横肋，其几何形状如图 8－9 所示。

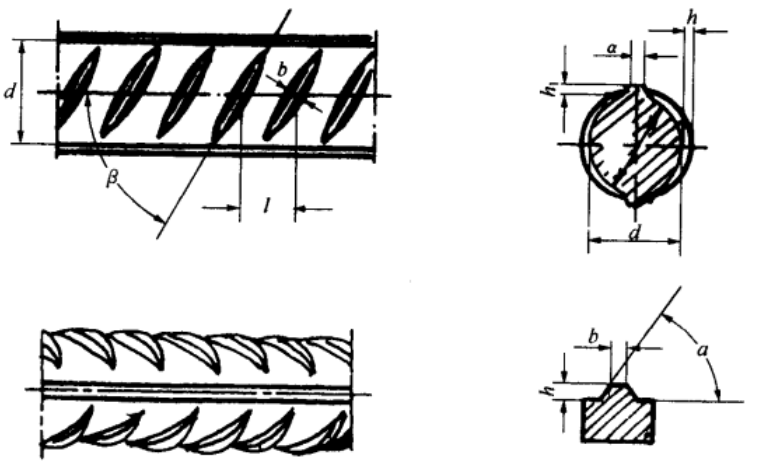


图 8－9　月牙肋钢筋表面及截面形状

d—钢筋内径；α—横肋斜角；β—横肋与轴线夹角；

a—纵肋顶宽；l—横肋间距；b—横肋顶宽；h—横肋高度；

根据国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》（GB 1499—1998）的规定，热轧钢筋按机械性能划分为 HRB335、HRB400、HRB500 三个牌号。各牌号钢筋的机械性能见表 8－9。

热轧带肋钢筋的机械性能 **表 8－9**

表面形状	牌号	公称直径（mm）	化学成分（%）不大于						屈服点 σ_s（或 $\sigma_{P0.2}$）（MPa）	抗拉强度 σ_b（MPa）	伸长率 δ_5（%）	弯曲试验弯芯直径
			C	Si	Mn	P	S	Ceq	不小于			
月牙肋	HRB335	6～25	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.52	335	490	16	3a
		28～50										4a
	HRB400	6～25	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.54	400	570	14	4a
		28～50										5a
	HRB500	6～25	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.55	500	630	12	6a
		28～50										7a

钢筋混凝土结构对热轧钢筋的要求是：机械强度较高，具有一定的塑性、韧性、冷弯性和可焊性。光圆钢筋的强度较低，但塑性及焊接性好，便于冷加工，广泛用作普通钢筋混凝土中的非预应力钢筋；热轧带肋钢筋的强度较高，塑性及焊接性也较好，广泛用作大、中型钢筋混凝土结构的受力钢筋以及预应力钢筋。

(2) 冷加工钢筋

a. 冷拉钢筋

为了提高强度以节约钢筋，工程中常按施工规程对钢筋进行冷拉。

由于冷拉钢筋的塑性、韧性较差，易发生脆断，因此，冷拉钢筋不宜用于负温及受冲击或重复荷载作用的结构。

冷拉Ⅰ级钢筋适用作非预应力受拉钢筋。冷拉热轧带肋钢筋强度较高，可用作预应力混凝土结构的预应力筋。

b. 冷拔低碳钢丝

冷拔低碳钢丝是用6.5～8 mm的碳素结构钢Q235或Q215盘条，通过拔丝机进行多次强力拉拔而成。根据《混凝土结构工程施工及验收规范》(GB 50204—92)的规定，冷拔低碳钢丝分为甲乙两级。甲级钢丝由符合Ⅰ级热轧钢筋标准的圆盘条拔制而成，主要用做预应力筋。乙级钢丝用于焊接网、焊接骨架、箍筋和构造钢筋等。

冷拔低碳钢丝由于经过反复拉拔强化，强度大为提高，但塑性显著降低，脆性随之增加，已属硬钢类钢筋。由于加工时受到原材料质量和工艺的影响较大，常有强度和塑性离散性较大情况，故使用时应加注意分析。

冷拔低碳钢丝的力学性能应符合表8－10的规定。

冷拔低碳钢丝的力学性能 **表8－10**

钢丝级别	直径(mm)	抗拉强度(MPa)		伸长率 δ_{100} (%)	180°反复弯曲(次数)
		Ⅰ组	Ⅱ组		
		不小于			
甲级	5	650	660	3.0	4
	4	700	650	2.5	4
乙级	3～5	550		2.0	4

注：预应力冷拔低碳钢丝经机械调直后，抗拉强度标准值应降低50 MPa。

c. 冷轧带肋钢筋

将热轧圆盘条经冷轧和冷拔减径后在其表面冷轧形成三面有月牙肋的钢筋即形成冷轧钢筋。

冷轧钢筋强度高、焊接性好，广泛用于中、小预应力混凝土结构构件和普通钢筋混凝土结构构件中，也适用于上述构件的在工厂制造，用冷轧带肋钢筋或冷轧光圆钢筋焊接而成的钢筋网。

冷轧带肋钢筋代号为LL×××(第一个L为“冷”字的汉语拼音字头，第二个L为“肋”字的汉语拼音字头，后面的“×××”为三位阿拉伯数字，表示钢筋抗拉强度等级数值)。钢筋按抗拉强度分为三级：LL550、LL650、LL800。分别表示抗拉强度不小于

550 MPa、650 MPa、800 MPa 的钢筋。其机械性能指标见表 8－11。

冷轧带肋钢筋机械性能 **表 8－11**

级别代号	牌号	屈服强度 $\sigma_{0.2}$（MPa）不小于	抗拉强度 σ_b（MPa）不小于	伸长率不小于（%）		冷弯 180° D 弯芯直径 d 钢筋公称直径	压力松弛 $\sigma_{con}=0.7\sigma_b$	
				δ_{10}	δ_{100}		1 000 h 不大于（%）	10 h 不大于（%）
LL550	Q215	500	550	8	—	D=3 d	—	—
LL650	Q235	520	650	—	4	D=4 d	8	5
LL800	24 MnTi	640	800	—	4	D=5 d	8	5

冷轧钢筋的直径为 5、6、7、8、9、10 mm 等几种，钢筋交货时一般为盘圆，每盘由一束长钢筋组成。LL650、LL800 级钢筋不应有焊接接头。

（3）热处理钢筋

热处理钢筋是用热轧螺纹钢筋经淬火和回火进行调质处理而成的，代号为 RB150。根据《预应力混凝土用热处理钢筋》（GB 4463—84）的规定：热处理钢筋有 $40Si_2Mn$、$48Si_2Mn$ 和 $45Si_2Cr$ 等三个牌号；公称直径分别为 6、8.2 和 10 mm；其强度要求均为屈服点 $\sigma_{0.2}$不低于 1 325 MPa，抗拉强度 σ_b不低于 1 470 MPa；其伸长率 δ_{10}要求均不低于 6%。

热处理钢筋目前主要用于预应力混凝土轨枕，用以代替高强度钢丝，配筋根数减少，制作方便，锚固性能好，建立预应力稳定。也用于预应力混凝土板、梁和吊车梁，使用效果良好。

热处理钢筋系成盘供应（每盘长约 200 m），开盘后能自然伸直，不需调直、焊接，故施工简单，并可节约钢材。

（4）钢丝和钢绞线

钢丝和钢绞线均由优质碳素结构钢经过冷加工、热处理、冷轧、绞捻等过程制得。它们的特点是强度高、安全可靠、便于施工，一般用于预应力混凝土结构中。

按照《预应力混凝土用钢丝》（GB/T 5223—1995）的规定，钢丝可分为冷拉钢丝和消除应力钢丝两种。消除应力钢丝按外形又可分为光面钢丝、刻痕钢丝、螺旋肋钢丝。其代号分别是：冷拉钢丝为 RCD，消除应力钢丝为 S，消除应力刻痕钢丝为 SI，消除应力螺旋肋钢丝为 SH。钢丝直径有 3、4、5 mm 三种规格，抗拉强度 σ_b 可达 1 670 MPa。

钢丝由含碳量不低于 0.8%的优质碳素结构钢盘条，经冷拔及回火制成，具有较好的力学性能。将钢丝表面沿长度方向压出刻痕，再做低温回火处理即形成刻痕钢丝，刻痕钢丝分为两面刻痕钢丝和三面刻痕钢丝，见图 8－10，这种钢丝应用于钢筋混凝土结构中可以增加

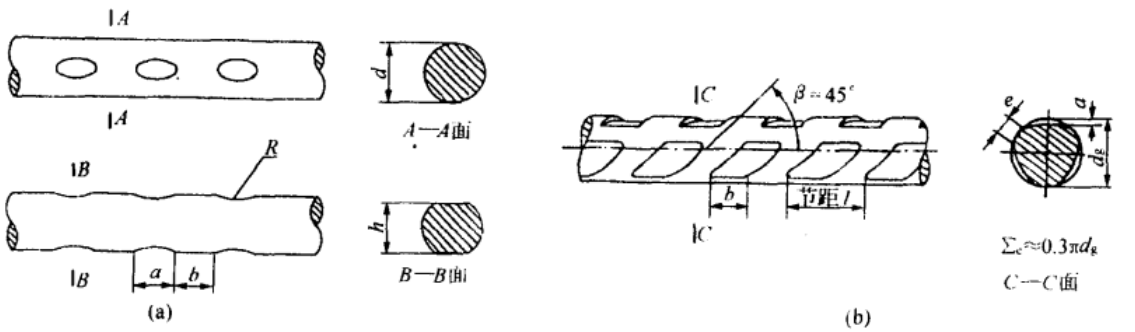


图 8－10 刻痕钢丝外形图

（a）两面刻痕钢丝 （b）三面刻痕钢丝

钢丝与混凝土之间的摩擦阻力，改善钢筋混凝土结构的受力性能。预应力螺旋肋钢丝的外形如图 8－11 所示，其中 C 为螺旋肋导程，D 为外轮廓直径，D_1 为基圆直径，a 为单肋宽度，b 为单肋深度。

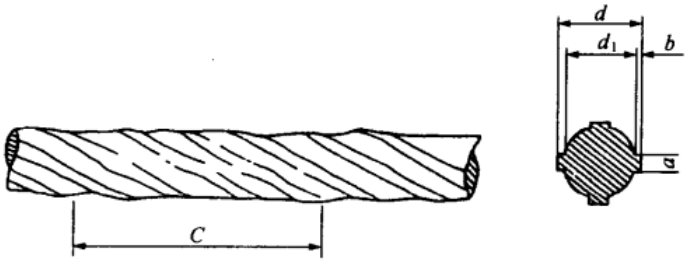


图 8－11　预应力螺旋肋钢丝外形图

预应力钢绞线按捻制结构分为用两根、三根和七根圆形断面的高强度钢丝捻制而形成，根据其应力松弛性能又可将其分为Ⅰ级松弛（代号Ⅰ）和Ⅱ级松弛（代号Ⅱ）两种。钢绞线的标记反映了钢绞线的分类情况。例如："预应力钢绞线 1×3—10.80—1720—Ⅰ—GB/T 5224—1995"表示的是公称直径为 10.80 mm，强度级别为 1 720 MPa，Ⅰ级松弛的用三根钢丝捻制而成的（1×3）钢绞线。其中"GB/T 5224—1995"为现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》的代号。

每盘钢绞线由一整根组成，其长度不小于 200 m。钢绞线的捻向一般向左（S）捻，特殊情况下也可右（Z）捻。捻制后，为消除捻制时产生的应力，应进行热处理。钢绞线的尺寸及拉伸性能见表 8－12。

钢绞线的尺寸及拉伸性能　　表 8－12

钢绞线结构		钢绞线公称直径（mm）		强度等级（MPa）	整根钢绞线的最大负荷（kN）	屈服负荷（kN）	伸长率(%)	1 000 h 松弛率，% 不大于			
								Ⅰ级松弛		Ⅱ级松弛	
								初始负荷			
		钢绞线	钢丝		不小于			70%公称最大负荷	80%公称最大负荷	70%公称最大负荷	80%公称最大负荷
1×2		10.00	5.00	1720	67.9	57.7	3.5	8.0	12	2.5	4.5
		12.00	6.00		97.9	83.2					
1×3		10.80	5.00		102	86.7					
		12.90	6.00		147	125					
1×7	标准型	9.50	——	1 860	102	86.6					
		11.10	——	1 860	138	117					
		12.70	——	1 860	184	156					
		15.20	——	1 720	239	203					
			——	1 860	259	220					
	模拔型	12.70	——	1 860	209	178					
		15.20	——	1 820	300	255					

注：

1. Ⅰ级松弛即普通松弛级，Ⅱ级松弛即低松弛级。它们分别适用所有钢绞线。
2. 屈服负荷不小于整根钢绞线公称最大负荷的 85%。
3. 1×7 结构钢绞线也按 ISO 6934－4：1991（E）分成"标准型"和"模拔型"两种。
4. 1×7 结构钢绞线中心钢丝直径加大范围不小于 2.0%。

预应力钢丝和钢绞线主要用于大跨度、大负荷的桥梁、电杆、枕轨、屋架、大跨度吊车梁等，安全可靠，节约钢材，且不需冷拉，焊接接头等加工，因此在土木工程中得到广泛应用。

四、焊接材料

焊接是土木工程中常用的工艺手段之一，在钢结构框架及构件制作，钢筋混凝土中钢筋的连接上经常使用。

影响焊接质量的因素很多，如施焊工件的材质、结构形状、焊接设备的性能等。做好它们的合理选用与配合，可以保证焊接成品的质量。

不同类别的钢种选用不同材质的焊条。即使是同一钢种，也可能由于环境、结构上的差异而选用不同的焊条。焊条材质可分为碳素结构钢与低合金结构钢两种。

碳素钢的焊接：一般说来，低碳钢焊接性能较好。中碳钢随着含碳量的增加，产生焊接裂缝的倾向加大。选用焊条时，多采用低氢焊条。

普通低合金钢的焊接：目前广泛使用的品种，如 Q345、Q390 等，都具有较好的焊接性能，可选用相应强度的电焊条焊接。

根据药皮的不同，结构钢焊条大体分为酸性型和碱性低氢型两大类。根据施焊构件的材质、化学成分、形状等，按工艺要求做不同的选用。

1．结构钢电焊条

电焊条规格品种繁多，其牌号的表示规定如下：

第一部分为一个汉字，表示电焊条的分类：

如：结——结构钢电焊条；

热——钼和铬钼耐热电焊条；

奥——奥式体不锈钢焊条；

堆——堆焊电焊条；

铸——铸铁电焊条。

第二部分为数码代号，由 0～9 表示，代表药皮类型及电源种类。如“5”代表锰型药皮，电源直交流均可；又如“7”代表低氢型药皮，电源为直流。详情可查阅有关手册，这里不做更多的引述。

结构钢电焊条主要用来焊接碳素钢、普通低合金钢及铸钢，属于用量最大的电焊条品种之一。

结构钢电焊条的规格型号很多，各种部颁标准及国家标准分别给出了对焊条成分及性能的要求。主要包括：焊缝金属化学成分、机械性能、使用电源类型、参考电流值、药皮类型等。相应的用途或使用范围亦随上述规定及要求而定，使用时请查阅相应的标准及手册。

2．铸铁电焊条

铸铁焊接的施焊物可以有不同的材质，主要有：一般灰口铸铁、高强度铸铁、耐热铸铁、可锻铸铁及球墨铸铁等。他们对焊条各有其特殊要求，因而形成了铸铁焊条的多个品种。

铸铁电焊条的牌号表示：由汉字“铸”开头，后接三个一位码，分别为：

第一个数码取值 1～6，表示焊缝金属主要化学成分组成，其中 1——碳素钢或高钒钢；2——铸铁；3——纯镍；4——镍铁；5——镍钢；6——铜铁。

第二个数码取值 0～9，表示同一药皮类型焊条的牌号，共十种。

第三个数码取值 0～9，表示药皮类型与电源种类（与结构钢电焊条的规定及含义相同）。

例：铸 127。表示铸铁电焊条，焊缝金属主要化学成分属碳素钢或高钒钢，药皮第 2 个牌号，低氢型药皮，工作时用直流电流。

3．焊剂

在进行自动焊、半自动焊及电渣焊时，必须正确选择焊剂及相应的工艺措施，以适应不同的施焊材料及施焊结构。

一般的低碳钢结构，可选用高锰高硅型焊剂（配以 H08A 和 H08MnA 焊丝）；也可选用低锰型、无锰型焊剂（配以 H08MnA 和 $H10Mn_2$ 焊丝），均可使焊接接头具有较好的机械性能。

对于低温钢、耐热钢、耐腐蚀钢等特殊钢种，应选用中硅型和低硅型焊剂。

焊剂使用前，必须注意以下几点：

（1）除特殊情况外，在使用前一般应在 250 ℃下烘烤 1～2 h。

（2）施焊前必须清除焊接处的铁锈及污垢。

五、钢材的防锈

钢材的锈蚀是指其表面与周围介质发生化学反应而遭到的破坏。一般而言：钢材的表面锈蚀主要因电化学作用而引起，由于钢材本身组成上的原因和杂质的存在，在表面介质的作用下，各成分电极电位的不同，形成微电池，铁元素失去了电子成为 Fe^{2+} 离子进入介质溶液，与溶液中的 OH^- 离子结合生成$Fe(OH)_2$，使钢材遭到腐蚀，腐蚀的结果是在钢材表面形成疏松的氧化物，使钢结构断面减小，降低钢材的性能，因而承载力降低，甚至由于局部腐蚀引发应力集中，导致钢结构突然破坏，造成严重的后果。凡钢材本身含杂质多，表面不平，经冷加工，存在内应力，有外部电解质作用，均会加剧锈蚀。

钢结构防止锈蚀的方法通常是表面刷防锈漆，常用底漆有红丹、环氧富锌漆、铁红环氧漆等；面漆有灰铅油、醇酸磁漆、酚醛磁漆等。薄壁钢材可采用热浸镀锌或镀锌后加涂塑料涂层。对于一些行业如电气、冶金、石油、化工、医药等的高温设备钢结构，可采用硅氧化合结构的耐高温防腐涂料，其可耐温度范围从 150～250 ℃或以上。此外，近年来用于钢结构的一些阻燃型、导静电型、耐温型、隔热型单功能防腐涂料发展很快，品种很多，性能优良，使用时可参照有关资料择优选择。

钢材还可以通过镀锌、镀锡来达到防锈的目的。

埋于混凝土中的钢筋经常有一层碱性保护膜，（新浇混凝土的 pH 值约为 12.5 或更高），故在碱性介质中不致锈蚀。但是一些外加剂中含有的氯离子会破坏保护膜，促进钢材的锈蚀。因此，混凝土的防锈措施应考虑：限制水灰比和水泥用量，限制氯盐外加剂的使用，采取措施保证混凝土的密实性，还可以采用掺加防锈剂（如重铬酸盐等）的方法。

对于预应力钢筋，特别是高强度热处理钢筋，一般含碳量较高，又经多次变形加工或冷拉易产生应力锈蚀现象。故重要的预应力承重结构除不能掺加氯盐外，应对原材料进行严格检验。

六、钢材的防火

钢材的防锈已广为人知，但对钢材，特别是钢结构的防火 ，却常引起常识上的疏忽。实际上，尽管钢结构具有良好的机械性能，尤其是很高的强度，但在高温时，却会发生很大的变化。裸露的、未作表面防火处理的钢结构，耐火极限仅 15 min 左右。在温升 500 ℃的环境下，强度迅速降低，甚至会迅速塌垮。因此，对于钢结构，尤其是有可能经历高温环境的钢结构，需要作必要的防火处理，主要的方法是在其表面上涂敷防火涂料。

防火涂料主要有以下几种：

1. STI－A 型钢结构防火涂料。STI－A 型钢结构防火涂料以特制的保温蛭石为集料，用无机胶结材料、防火添加剂及化学助剂调配而成。

这种防火涂料的体积密度小（仅 400＋40 kg/m³），导热系数小（试验温度为 800～1 000 ℃时，导热系数在 0.109 0～0.110 9 W/（m·K）之间），因而具有良好的防火隔热性能，可用作各类钢结构及钢筋混凝土结构的防火阻挡层。经鉴定：用这种防火涂料制作钢结构防火层，涂料厚度 2.8 cm 时，其耐火极限可达 3 h。

2. LG 钢结构防火隔热涂料。LG 钢结构防火隔热涂料用于礼堂、影剧院、展览馆、商店、宾馆、体育馆、办公楼、电视塔、仓库等工业与民用建筑物室内钢结构，也可用于防火墙、防火挡板及电缆沟内的钢结构等。

LG 钢结构隔热防火涂料由改性无机高温粘接剂、化学助剂与空心微球、膨胀珍珠岩等吸热、隔热、增强材料配合而成，是一种新兴涂料。

这种防火涂料具有良好性能，主要有：

（1）体积密度小：约为 358 kg/m³。

（2）导热系数小：约为 0.090 7 W/（m·K）。

（3）防火隔热性能好：用它制作防火涂层，厚度 15 mm 时，钢结构耐火极限可达1.5 h。涂层厚度可根据耐火极限要求来调整。

（4）附着力强，干燥固化快，易于施工及使用，且不易破裂脱落。

（5）无毒、无污染、不腐蚀钢材，在高温时不产生浓烟。

（6）可按需要配色，具有一定的视觉效果。

防火隔热涂料一般采用分层喷涂工艺制作涂层。局部修补时，可用手工抹涂或刮涂。

第二节　铝材及铝合金

铝为银白色轻金属，密度为 2.7 g/cm³，塑性好、导电、导热性能强，但是强度低。铝的化学性质很活泼，在空气中易和空气反应，生成一层氧化铝薄膜，覆盖在下层金属表面，阻止其继续腐蚀。纯铝产品有铝锭和铝材两种。铝锭的牌号以“Al－顺序号”表示。顺序号由 0、1、2 分别组成，顺序号愈大，表示铝的纯度愈低。如 Al－00 表示纯度为 99.7%的特一号铝，Al－0 为纯度为 99.6%的特二号铝，Al－1 表示纯度为 99.5－99.3%的一号铝，Al－2为含铝 99.0－98.8%的第二号铝。铝材的牌号用汉语拼音字母“L”加上顺序号表示，共分七级，级数愈大含杂质愈多，其纯度愈低，如“L_1”表示含铝 99.7%的铝材，“L_2”“L_3”分别表示含铝为 99.6%和含铝 99.5%的铝材。

纯铝可加工成铝粉，用于加气混凝土的发气，也可作为防腐涂料（又称银粉）用于铸铁、钢材等的防腐。

在纯铝中加入铜、镁、锰、锌、硅、铬等合金元素就成为铝合金。铝合金由于一般机械性能明显提高并仍然保持铝重量轻的固有特性，因此，使用价值也大为提高。

铝合金有防锈铝合金（LF），硬铝合金（LY），超硬铝合金（LC），锻铝合金（LD），铸铝合金（LZ）。按应用可分为三类：

一类结构，以强度为主要因素的受力构件，如屋架等。

二类结构，以不承力构件或承力不大的构件，如建筑工程的门、窗、卫生设备、管系、

通风管、挡风板、支架、流线型罩壳、扶手等。

三类结构，主要是各种装饰品和绝热材料。

铝合金由于延伸性好，硬度低，可锯可刨，可通过热轧、冷轧、冲压、挤压、弯曲、卷边等加工，制成不同尺寸不同形状和截面的板、管、棒及各种型材和铝箔。目前，我国各地所产铝及铝合金材料已构成较完整的系列。使用时，可按需要和要求参考有关手册和产品目录，对铝及铝合金的品种和规格，作出合理选择。

常用的铝合金品种有：

1．铝合金门窗

在现代建筑中用铝合金门窗，尽管造价比普通门窗高3－4倍，但由于长期维修费用低，性能好、美观、节约能源等，所以在世界范围内仍然得到广泛使用。铝合金门窗与普通门窗相比具有如下特点：

（1）轻：铝合金门窗用材省，重量轻，每平方米耗用铝材重量平均只有8～12 kg，较钢木门窗轻50%左右。

（2）性能好：铝合金门窗密封性能好，气密性、水密性、隔音性、隔热性都较普通门窗有显著提高。

（3）色调美观：铝合金门窗框料型材表面经过氧化着色处理，即可保持银白色也可以根据需要制成各种柔和的颜色或带色的花纹。

（4）耐腐蚀：铝合金门窗不需涂漆，不腿色、不脱落、表面不需维修，因而使用简单方便。

（5）便于工业化生产。

2．铝合金装饰板及吊顶

（1）铝合金花纹板：是采用防锈铝合金材料，用特制花纹机辊轧而成，花纹美观大方，筋高适中，不易磨损，防滑性能好，防腐蚀性能强，也便于冲洗。通过表面处理可以得到不同美丽颜色，广泛用于现代建筑物的墙面装饰及楼梯踏板等处。

（2）铝质浅花纹板：铝合金浅质花纹板花纹精确别致，色泽美观大方，除具有普通纹板共有的优点以外，刚度提高20%，抗污垢、抗划伤、擦伤能力均有提高，尤其是增加了立体图案和美丽的色彩，更使建筑物生辉。

（3）铝及铝合金波纹板：这种板材主要用于墙面装饰，也可用作屋面。有银白等多种颜色，既有一定装饰效果也有很强的反射阳光能力，并十分经久耐用，在大气中使用二十年不需更换，搬迁拆卸下来的花纹板仍可使用，因而受到了广泛应用，见图8－12。

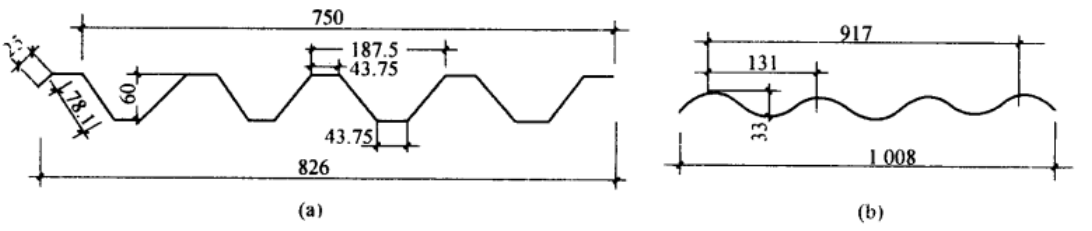


图8－12　波纹板的波形

（a）V60—187.5压型板　（b）W33—131波纹板

（4）铝及铝合金压型板：具有重量轻、外形美观、耐久、耐腐蚀、安装容易、施工进度

快等优点。通过表面处理可得到各种色彩的压型板，主要用于屋面和墙面。如图 8－13 所示。

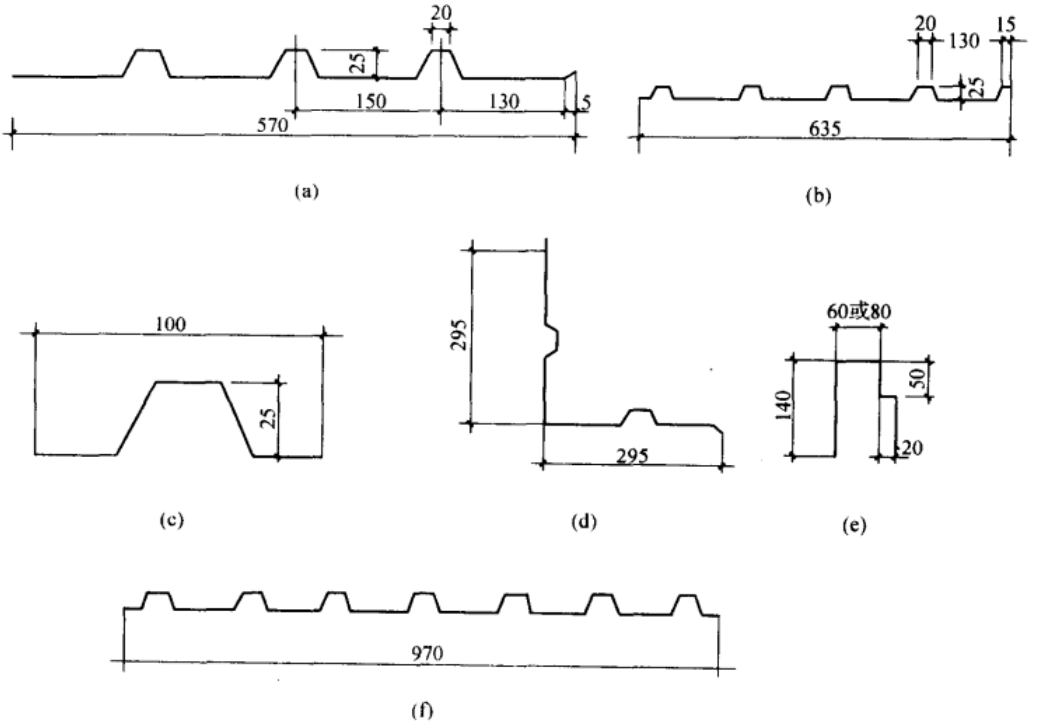


图 8－13　铝合金压型板的板型

(a) 1 型压型板；(b) 2 型压型板；(c) 6 型压型板

(d) 7 型压型板；(e) 8 型压型板；(f) 9 型压型板

(5) 铝和铝合金冲孔平板：它是采用各种铝合金平板经机械冲孔而成，具有良好的防腐蚀性能，光洁度高，有一定强度，易加工成各种形状、尺寸，有良好的防震、防水、防火性能、良好的消音效果。主要用于：棉纺厂、各种控制室、电子计算机房的天棚及墙壁，也用于噪音大的车间厂房，也是电影院、剧场的理想消音材料。

(6) 铝合金吊顶：其特点是重量轻、不燃烧、耐腐蚀、施工方便、装饰华丽等。

3. 铝箔

铝箔是指用纯铝或铝合金加工成 6.3～200 μm 的薄片制品。

铝箔按状态和材质可分为硬质箔、半硬质箔和软质箔。硬质箔是轧制后未经软化处理(退火) 的铝箔。软质箔是轧制后经过充分退火而变软的铝箔。多用于包装、电工材料、复合材料中。半硬质箔的硬度介于硬、软箔之间，常用于成型加工。

铝箔的力学性能包括抗拉强度、伸长率、破裂强度和撕裂强度。铝箔还具有很好的防潮性能和绝热性能并以全新多功能保温隔热材料和防潮材料广泛用于土木工程中。建筑上应用较多的卷材是铝箔牛皮纸和铝箔布，前者用做绝热材料，后者多用在寒冷地区做保温窗帘，炎热地区做隔热窗帘以及太阳房和农业温室中做活动隔热屏。

板材型，如铝箔泡沫塑料板、铝箔波形板、微孔铝箔波形板、铝箔石棉纸夹心板等，它们强度较高，刚度较好，常用在室内或者设备内表面上，选择适当色调和图案，可同时起到

很好的装饰作用。微孔波形板还有很好的吸声作用。

在炎热地区，铝箔用在围护结构外表面，可以反射掉大量太阳辐射热，产生“冷房效应”；在寒冷地区，可减少室内向室外散热损失，提高墙体保温能力。

我国目前铝的产量不多，但铝矿储量极为丰富，随着国民经济建设的迅速发展，铝及铝合金产量会大幅度提高。铝在土木工程中的应用也将越来越普及。

第三节　其它金属材料

一、铸铁

含碳量大于2%的铁碳合金称为生铁。生铁除含碳量较高外尚含较多的硅锰磷硫等元素。常用的是灰口生铁，其中碳全部或大部呈石墨形式存在，断口呈灰色，故称灰铸铁或简称铸铁。铸铁具有良好的铸造性能，成本低，是工业上用途十分广泛的一种黑色金属材料。

铸铁性脆，无塑性，抗压强度较高，但抗拉和抗弯强度不高，不宜用作结构材料。在建筑中大量采用铸铁水管，用作上下水道及其连接件，土木工程中也用作排水沟、地沟、窨井等的盖板。在工业与民用建筑及建筑设备中广泛采用铸铁制作暖气片及各种零部件。铸铁也是一种常用的装饰材料，用于制作门、窗、栏杆、栅栏及某些建筑小品等。

二、铜

铜为紫红色金属，具有良好的延展性，但强度较低，易生锈。将纯铜压延成薄片（紫铜片）和线材，是良好的止水材料和电的传导材料。铜的合金分为黄铜（铜锌合金）和青铜（铜锡合金），特点是强度较高、耐磨、耐蚀。

黄铜呈黄色或金黄色，装饰性好，主要用于生产建筑上的门窗、门窗花格、栏杆、抛光板材、铜管等；黄铜也用于生产建筑五金、水暖器材等；用黄铜生产的铜粉（又称金粉），用作涂料起到装饰和防腐作用。

青铜为青灰色或灰黄色，硬度大、强度较高、耐磨及抗蚀性好，主要用于生产板材、管材、机械零件等。

三、铅

铅是一种柔软的低熔点（327℃）金属，抗拉强度很低，延展加工性能极好。常用于钢铁管道接口的嵌缝密封材料。铅板和铅管是工业上常用的耐腐蚀材料，能经受浓度80%的热硫酸和浓度92%的冷硫酸的侵蚀。铅板还常用于医院实验室和工业建筑中的X、γ射线操作室和屏蔽材料。

第九章　建筑木材

木材是取自于树木躯干或枝干的材料。它是典型的天然有机高分子材料，是土木建筑工程中应用最早和性能最优良的建筑材料之一。木材是纤维结构材料，具有明显的各向异性，其性能还与其所取自的树木种类和含水状态等因素有关。

一、木材的分类与结构

1. 木材的分类

依据木材的基本性能可分为软木材和硬木材，它们主要取决于所取自的树木种类。

（1）软木材

软木材多取自于针叶树，如松、柏、杉等。针叶树的树干通直高大、材质均匀。软木材木质较软且易于加工，切面纹理顺直，是良好的装饰材料。软木材的强度较高，表观密度较小，耐腐蚀性较好，在使用环境条件下的胀缩变形较小。是土木建筑工程中应用很广泛的材料。

（2）硬木材

硬木材是取自于阔叶树的木材，如榆、槐、柳、柞等。阔叶树树身弯曲多节，树干通直部分较短，其材质较硬，疤节较多，难以加工。硬木材的切面纹理美观，适于制作外观效果漂亮的家具及高档装修。硬木材的表观密度较大，强度较高，经湿度变化后体积变形大，容易产生翘曲或开裂，使用时需要精心加工。

2. 木材的构造

构造是材料内各质点间的相互联结方式。根据不同的分析层次，可从宏观与微观两方面考察木材的构造。

（1）木材的宏观构造

木材的宏观构造是指用裸眼或借助普通放大镜可以观察到的组织结构。由于木材是典型的纤维结构和各向异性结构，从不同的切面上可表现出不同的纹理结构，如图9-1。

从宏观状态来看，原木由表及里是由树皮、木质部和髓心三部分组成的。其中树皮的物理力学性能不大适合工程要求，髓心因性能差且易腐蚀应用也很少，工程主要应用的是木质部。在木质部的横切面上，有颜色明显差别的同心圆，并以髓心为圆心，这些圆称为树木的年轮。另外，还有从髓心向外的辐射线，它被称为髓线。髓线处是木质部中联结较差的部分，它在木材生长过程中起

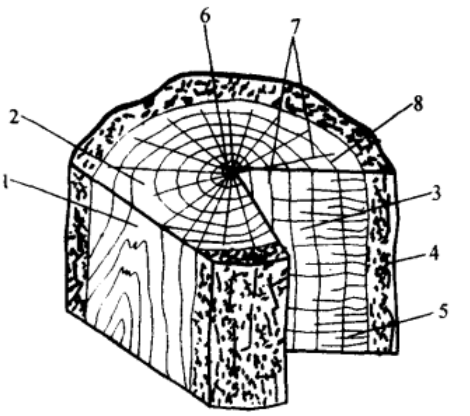


图9-1　木材的切面构造

1—弦切面；2—横切面；3—径切面；4—树皮；5—木质部；6—髓心；7—髓线；8—年轮

着供应养分的作用，但在使用中是薄弱点，特别是在木材严重变形时容易沿髓线开裂。木材的年轮反映了生长时间的长短，年轮越密时说明木材生长较慢，其材质越均匀，力学性能越好。

沿髓心剖切的面称为径切面，在径切面上年轮表现为颜色深浅变化的平行线。沿与髓心平行方向剖切的面称为木材的弦切面。在弦切面上，由于树木的年轮（面）与髓线（面）构成的自然曲线使得切面表现出了自然美丽的花纹，工程中多以木材的弦切面作为装饰面。

（2）木材的微观构造

木材的微观构造是指木材在显微镜下可观察到的组织结构。在微观状态下，木材是由大量紧密联结的管状细胞构成的，并且细胞均沿纵向排列成纤维状，使其形成了纤维结构。木纤维中的细胞是由细胞壁与细胞腔构成的，细胞壁是由更细的纤维组成的，各细纤维间可以吸附或渗透水分，构成独特的壁状结构。构成木材的细胞壁越厚时，细胞腔的尺寸就越小，表现出细胞越致密，承受外力的能力越强，细胞壁吸附水分的能力也越强，从而表现出湿胀干缩性更大，这种情况对于阔叶树最为明显。

二、木材的物理力学性质

1．木材的含水率

通常条件下木材中多含有水分，这些水分可能以不同的状态存在于木材内部结构的不同部位，并且对木材性能的影响也不一样。其中所含的水分可分为：

（1）结合水

结合水是木纤维中有机高分子形成过程中所吸收的化学结合水，是构成木材必不可少的组分，也是木材中最稳定的水分。

（2）吸附水

吸附水是吸附在木材细胞壁内各木纤维之间的水分。通常木纤维间的空隙很小，但是纤维具有较好的弹性。在宏观状态下当水分嵌固在细胞壁内部时，它就成为构成木细胞壁的组分之一。因此，水分一旦渗入细胞壁的空隙中形成吸附水，就会影响木细胞的总体性能。

（3）自由水

自由水是填充于细胞腔或细胞间隙中的水分，它对木细胞的吸附能力很差，是木材中最不稳定的水分。

综上所述，当木材含水率很小时，所含水分最可能是结合水；随着含水率的增大，就会出现吸附水；当含水率较大时才可能出现自由水。

2．木材的纤维饱和点

已经知道，结合水是构成木材的必要成分，正常状态下的木材中结合水应是饱和的，它的存在并不影响木材的纤维结构状态。但是随着含水率的增大，多余的水分就以吸附水的形式存在于细胞壁内各纤维之间，致使细胞壁变形和细胞腔增大。当含水率增大至吸附水达到饱和状态时，细胞变形的程度也会达到最大。此后，木材的含水率再增大时，多余的水分就会以自由水的形式存在，不再影响木细胞的变形。

木材的纤维饱和点是指木材中吸附水达到饱和，并且尚无自由水时的含水率。此时，木材细胞的变形已达到最大，水分再增加也不会明显改变木细胞的结构与状态。木材的纤维饱和点往往是木材性能变化规律的转折点，对一般木材多为25%～35%。

3．木材的平衡含水率

正常情况下当处于某一环境中时，木材中所含水分是在不断运动的，有些水分在不断向

环境中扩散，另一些水分不断由环境中向木材中渗透。当水分向外扩散的速度与向内渗透的速度相等时，表现为木材的含水率恒定不变，此时的含水率就是木材的平衡含水率。木材平衡含水率的大小除了与木材的结构有关外，还与所处的环境有关。因为当环境中湿度较大时，水分向木材中渗透的速度必然增大，与其平衡的水分扩散速度也必须增大，而水分向外扩散速度增大的条件就是木材本身必须具有较大的含水率。所以随着环境中湿度的增大，木材的平衡含水率也会增大。

当木材开始置于较干燥环境中时，其含水率大于此环境的平衡含水率，水分会逐渐向环境中散发，这种现象称为木材的蒸发或干燥。当木材开始置于较潮湿的环境中时，其含水率低于此环境的平衡含水率，就会吸收环境中的水分，该现象称为木材吸湿。经过一段时间的蒸发或吸湿过程后木材会达到相应的平衡含水率，我国北方地区大气环境条件下的木材平衡含水率为12%左右。

4．木材的湿胀

通常情况下，当木材含水率处于纤维饱和点以下时，含水率的增加意味着木材中吸附水的增加。已经知道，木材中吸附水的增加会明显增大木细胞壁的膨胀变形。因此，随着含水率的增大，木材的体积会明显膨胀；反之，木材的体积明显收缩，这种现象称为木材湿胀。

因为木材是典型的纤维结构材料，其细胞排列及吸附水分后的体积膨胀具有明显的方向性。所以，其湿胀也表现为明显的各向异性。其中弦向湿胀最明显，其次是径向和纵向，不同方向的湿胀规律如图9-2。

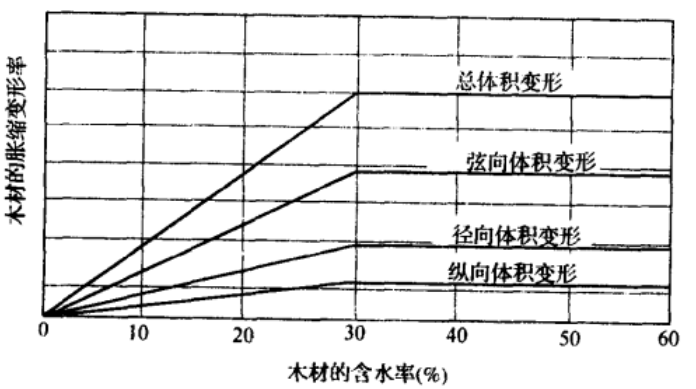


图9-2　木材含水率对不同方向变形的影响

当木材的含水率超过纤维饱和点时，随着含水率的增加，所增加的只是自由水，它对木材体积不会产生明显的影响。因此当含水率大于纤维饱和点时，含水率的增减并不影响木材的湿胀。

值得注意的是，木材的湿胀现象对其实际应用具有很大的影响，通常在制作木构件前先将其干燥或泅湿，使其含水率达到使用环境条件下的平衡含水率。否则，木构件安装后经过一段时间会产生湿胀或干缩，造成开裂或翘曲等变形。

5．木材的强度

木材的纤维结构也决定了它在力学性能方面具有明显的各向异性。从木材微观结构来看，沿木材纵向排列的木细胞是由木纤维联结而成的，在此方向具有很强联结能力，因此也具有最高的抗拉强度。而与纵向垂直方向各细胞间的联结能力很差，从而表现出很小的抗拉

强度。基于上述原因，木材承受不同外力时表现出的强度大小具有较大的差别。通常的大小关系为：

顺纹抗拉＞横纹抗弯＞顺纹抗压＞横纹抗剪＞顺纹抗剪＞横纹抗压＞横纹抗拉

由于宏观状态下木材的受力状态难以形成真正的顺纹抗拉，实际上表现出的最大强度是横纹抗弯强度。

与体积受含水率的影响相似，木材的强度也受含水率的影响。当在纤维饱和点以下时，随着含水率的增大，吸附水使细胞壁纤维间的间距增大，相互联结力显著降低，从而降低了木材的强度。当超过纤维饱和点后，随着含水率的增大木材的强度并不会产生明显的变化。显然达到纤维饱和点时，木材的强度接近了最低值。

考虑含水率对木材强度的影响，通常将含水率15%时所测得的强度作为标准强度，其它含水率时的强度可利用下式换算：

$$\sigma_{15} = \sigma_w[1 + \alpha(W - 15)]$$

其中 σ_{15}——含水率为15%时木材的标准强度；

σ_w——含水率为W%时木材的计算强度；

α——木材的含水率校正系数；

W——木材的实际含水率。

木材中疤节、扭曲、裂纹等疵病的存在对于其强度也有显著的影响，特别是硬木材表现更为明显。这些疵病改变了木材在某一方向上的力学均匀性，可能造成某些强度的下降，并影响切面外观，还为木材加工造成困难，显著降低使用价值，甚至使木材的使用价值丧失。这些疵病还使得木材难以取得较大的板块，因此木材疵病的多少也是选择的依据之一。

此外，木材在荷载的长期作用下也会产生徐变，导致内部结构变化并造成极限承载能力的下降。通常将木材在长期荷载作用下不致产生破坏的极限强度称为木材的持久强度。一般木材的持久强度约为暂时强度的50%～60%。用于受力结构时，木材的承载能力应以其持久强度作为强度计算依据。

6．木材的装饰性

通常木材的弦切面具有漂亮的花纹，其良好的弹性与保温性给人以舒适的印象，表面给人以淳朴、古雅、温暖和亲切的质感。因此从各方面来看，木材都是一种优良的装饰材料。

由于不同品种的木材各自具有独特的构造与颜色，使其切面纹理、花纹、颜色、光泽与气味等各有特色，选择不同品种的木材或采用不同的加工工艺可表现出不同的艺术效果，其装饰效果可变化多端。一般认为木装修可表现为典雅、高贵且朴实无华的外观。

三、木材的特点与应用

1．木材的特点

与其它常用建筑材料相比，木材在土木建筑工程中具有如下特点：

（1）轻质而高强。木材的表观密度多为400～600 kg/m^3，而其抗弯强度可达100 MPa，其比强度可达到0.2，比普通钢材（比强度为0.054）高数倍。因此，自古以来木材就是各种土木建筑工程中优良的结构材料。

（2）具有良好的弹性与韧性。木材良好的韧性使其可以承受各种荷载的作用而不会产生脆性破坏。良好的弹性使其应用于地面与墙面装饰时，表现出舒适与安全的效果。

（3）具有良好的加工性。因为木材可进行锯、刨、钻、凿、榫接或黏结等加工，可制成各种形状，并容易进行各种连接。木材可应用于各种新建工程或旧建筑物的装修。

（4）良好的绝热性与热稳定性。木材内部为多微孔结构，孔隙率很大，可达50%以上，使得木材的导热系数也很低，一般为0.3 W/（m.K）左右。良好的绝热性使其在使用中具有对建筑物或自身可靠的保暖性。木材的多孔结构也使其温度变化时不易产生胀缩变形，从而在工程中保持较好的体积稳定性。

（5）优良的装饰性。如前所述，木材具有变化多端的切面外观，可应用于各种表面装饰。

（6）较好的耐久性。适当环境条件下木材具有很好的耐久性，如长期干燥或长期浸于水中时可保持上百年，其性能并不显著恶化。

（7）防火能力差。木材在遇明火或高温时可能燃烧，造成火灾。因此建筑中选择采用木材时应考虑到防火要求，必要时应采取相应的防火措施（如防火涂料或浸渍等）。

（8）需要精心维护。木材在潮湿环境或干湿循环的环境中容易在内部繁衍真菌而腐朽；多数木材还容易滋生蛀虫，造成内部结构很快破坏。为防止这些破坏，使用前应精心防腐处理，使用中应定期进行表面防腐处理，这些既增加了成本，又为维护带来许多麻烦。

2．木材的应用

鉴于木材的许多优点，它在各种土木建筑工程中得到广泛的应用。在结构工程中可采用木结构的梁、板、柱；在维护与装饰工程中可采用木地板、木花格、木墙板、护壁板（或墙裙）、木天棚、木家具、木贴面等；在工程施工中用于制作脚手架、模板等。各种树木的枝条与下脚料还可生产胶合板、纤维板、水泥刨花板等。

第十章　建筑墙体材料

在房屋建筑工程中通常利用墙体对建筑物的空间进行分隔或围护，有时还需要墙体承受建筑荷载，因此在这些工程中离不开墙体材料。根据墙体所用材料及其结构类型的不同，常采用的墙体形式有砌体结构墙体和墙板结构墙体，其中构成砌体结构中所采用的块状材料有砖和砌块。在墙板结构中主要采用各种轻质板材。

第一节　墙体用砖

在砌筑墙体材料中，当砌体所使用块状材料的长度大于 365 mm，或宽度大于 240 mm，或厚度大于 115 mm 时称为砌块。当相关尺寸小于上述尺寸时则称为砖。

根据砖形成条件的不同，建筑中所使用的砖有烧结砖和非烧结砖两大类。烧结砖是以黏土及其它硅铝质废料为主要原料，经成型、焙烧而成的定型产品。当烧结砖为实心时，称为烧结普通砖，其标准尺寸为 240 mm×115 mm×53 mm；当其中含有尺寸较大的空心时，称为烧结空心砖与空心砌块；当其中含有大量小孔时，称为烧结多孔砖与砌块。此外，根据生产所用的原料不同又分为不同类型的烧结砖与砌块。以黏土为主要原料烧制的砖称为烧结黏土砖与砌块（代号 N）；以煤矸石为主要原料烧制的砖称为烧结煤矸石砖与砌块（代号 M）；以粉煤灰为主要原料烧制的砖称为烧结粉煤灰砖与砌块（代号 F）；以页岩为主要原料烧制的砖称为烧结页岩砖与砌块（代号 Y）。

有些砖或砌块是利用其中某些材料的胶结能力自行固化而成的，它们主要是通过材料的搅拌、成型与养护等过程而形成的，未经高温焙烧过程。这类砖称为非烧结砖或砌块。如灰砂砖、粉煤灰砖、炉渣砖、免烧黏土砖等。

由于烧结普通黏土砖生产中需要消耗大量的黏土和能源，是造成土地和能源紧张的主要因素之一；而且用普通黏土砖砌筑的墙体自重大，砌筑速度慢，不利于建筑工业化，隔热保温性也难以满足目前及以后的节能要求。为此，世界各国均采取措施限制生产和使用烧结普通砖，而且一些发达国家已经将其淘汰，代之以新型墙体材料。为满足可持续发展的长期需要，我国于 1991 年就已经开始加快建筑墙体材料改革的步伐，目前已对普通黏土砖的生产和使用进行了严格的限制。根据我国墙体材料发展的要求，未来墙体材料应向轻质、低能耗、高强度、大体积、利废环保方面发展。今后的几年内，普通黏土砖将逐步在我国各类城市建筑中退出其建筑墙体材料的主导地位，这一措施将对保护土地资源和能源产生重大影响。

随着我国建筑墙体材料改革不断走向成熟，性能更优良的新型材料将成为建筑墙体材料的主体。但是，鉴于目前主导型的新型材料尚未完全成熟，新型墙体材料需要逐步发展的过程。在新型材料的形成期间烧结空心与烧结多孔砖和砌块将是取代普通黏土砖的主要墙体材料之一。

一、烧结空心砖与空心砌块

烧结空心砖与空心砌块是以黏土、页岩、煤矸石、粉煤灰及其它废料为主原料，经焙烧

而成的空心块体材料。一般烧结空心砖与空心砌块的孔洞率≥35%，主要用于砌筑非承重的墙体结构。它们多为直角六面体的水平孔空心，在其外壁上应设有深度 1 mm 以上的凹槽以增加与砌筑胶结材料的结合力，砖的壁厚应大于 10 mm，肋厚应大于 7 mm。其外形及尺寸见图 10－1。

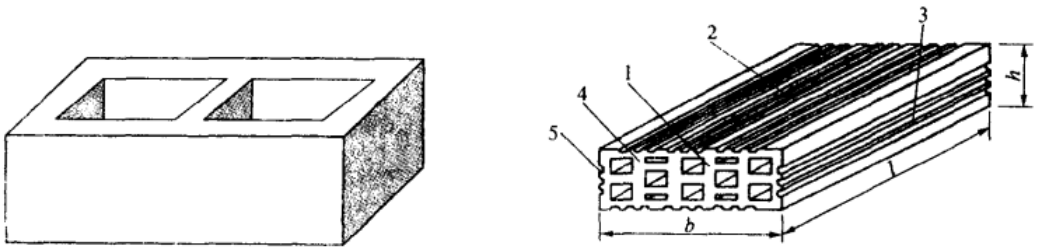


图 10－1　黏土空心砖与空心砌块外形

1—顶面；2—大面；3—条面；4—肋；5—凹线槽

1．烧结空心砖与空心砌块的生产

烧结空心砖与空心砌块的主要生产工艺为：

备料→配料调制→制坯→干燥→焙烧→成品

生产烧结空心砖与空心砌块的基本工艺与生产普通烧结砖基本相同，其主要差别是在生产烧结空心砖与空心砌块过程中，对所用原料需更精心处理，通常利用对辊破碎或轮碾使原料得以充分粉碎和匀化。制坯是生产的空心砖与空心砌块合格与否的关键环节，通常采用真空挤泥机和硬塑成型，来保证坯体的结构致密和坯体强度，以获得稳定准确的外形尺寸和较高的产品强度。焙烧是形成烧结砖成品质量的关键工序，在烧结过程中，随着温度的升高，坯体中的水分蒸发与矿物熔融造成了内部孔隙率的增加和体积收缩，这时只要保持一定时间内的高温，液相熔融物便会流入各固体颗粒的间隙中，并将其黏结。由于熔融物的填充与黏结作用，使得砖体的孔隙率显著下降，形成了密实连续的内部结构，整个过程称为焙烧。显然，焙烧温度与持续时间是否适当会显著影响其内部结构和产品质量。

烧结空心砖与空心砌块的技术性能与质量缺陷都是在生产过程中产生的，特别是干燥、码放与焙烧过程更是关键环节。由于各种因素的影响，有时可能造成某些质量缺陷。其中主要有泛霜、石灰爆裂、欠火砖、变形砖等缺陷。

泛霜是指砖成品在经过干湿循环后表面出现盐析的现象。其原因是有生产烧结砖的原料中含有较多的可溶性盐类物质，起初它们可能均匀的分布于砖体的内部，在遇到水后溶解形成了盐溶液。当砖体中水分向外迁移并蒸发时，这些可溶性盐随水迁移出来形成白色粉末并附着在砖的表面。

较轻的泛霜影响了建筑物的外观；泛霜较重时，会造成砖表面的不断粉化与脱落，降低墙体的抗冻融或抗干湿能力，建筑物外表严重剥落。过重的泛霜还可能很快降低墙体的承载能力。因此，国家标准要求优等砖不允许有泛霜现象，合格砖也不得有严重的泛霜。

当生产烧结砖的原料中混有较大颗粒的石灰石等杂质时，经过高温焙烧可能在砖体内部形成颗粒状生石灰。在砖体浸水后，内部的生石灰会因吸水消化产生体积膨胀，导致砖体胀裂破坏。

较轻微的石灰爆裂可能造成砖体的局部开裂或脱皮，严重的爆裂会使砖体崩溃。石灰爆裂是烧结砖内部的不安定隐患，轻者影响墙体外观，重者会影响承载能力，甚至危及建筑物

安全。为此，对优等品砖不允许出现破坏尺寸大于 2 mm 的爆裂区域。对合格品砖不允许出现破坏尺寸大于 15 mm 的爆裂区域。

根据烧结砖的焙烧过程不同，可生产出性能差别较大的产品。当烧结温度过低或焙烧时间太短时，砖体内各固体颗粒间的大量间隙不能填充与黏结，造成其孔隙率过大，内部结构不够密实和连续，这种砖就是欠火砖。通常，欠火砖的颜色较浅，表观密度较小，强度低，抗冻性差。

若砖在焙烧时温度过高或高温时间持续过长，可能使砖体中熔融物比例过多，导致高温下砖体变软而变形。当砖坯码放不当时，也容易出现弯曲变形等不良现象。此外，在生产过程中由于砖坯受冻融或干湿等因素的影响，可能造成部分砖体内部结构破坏而形成酥砖，这种砖不仅强度很低，而且很容易在受冻或动荷载作用下碎裂。

2. 烧结空心砖与空心砌块的质量要求

由于原料或烧结工艺方面的缺陷，很容易造成烧结空心砖与空心砌块的质量缺陷。这些缺陷可能严重影响其使用性能，甚至使其成为废品。针对不同产品等级的烧结空心砖与空心砌块，国家标准对其有严格的限制。

(1) 外观质量与尺寸偏差

常用空心砖的尺寸长为 290 mm、240 mm，宽为 240 mm、190 mm、180 mm、140 mm、115 mm，高度为 115 mm、90 mm。单向或多向尺寸大于上述限值时称为砌块。

在烧结砖的整个生产过程中，可能由于材料不均匀、所制的坯变形或尺寸过大、干燥工艺不合理、焙烧不当或装运码放不当等原因，造成砖体的各种外观缺陷或尺寸偏差。国家标准要求烧结空心砖与空心砌块质量指标的具体要求见表 10－1、表 10－2。

烧结空心砖与空心砌块的外观质量要求（mm）　　**表 10－1**

项　　目	优等品	一等品	合格品
1. 弯曲，不大于	3	4	4
2. 缺棱掉角的三个破坏尺寸，不得同时大于	15	30	40
3. 未贯穿裂纹长度，不大于 a. 大面上宽度方向及其延伸至条面的长度 b. 大面上长度方向及其延伸至顶面的长度或条顶面上水平裂纹的长度	 不允许 不允许	 100 120	 140 160
4. 贯穿裂纹长度，不大于 a. 大面上宽度方向及其延伸至条面的长度 b. 壁、肋沿长度方向及其延伸至条面的长度	 不允许 不允许	 60 60	 80 80
5. 肋、壁内残缺长度，不大于	不允许	60	80
6. 完整面，不少于	一条面和一大面	一条面或一大面	—
7. 欠火砖或酥砖	不允许	不允许	不允许

注：凡有下列缺陷之一者，不能称为完整面：

1. 缺损在大面、条面上造成的破坏面尺寸同时大于 20 mm×30 mm。
2. 大面、条面上裂纹宽度大于 1 mm，其长度超过 70 mm。
3. 压陷、粘底、焦花在大面、条面上凹或凸超过 2 mm，区域尺寸同时大于 20 mm×30 mm。

烧结空心砖与空心砌块尺寸允许偏差（mm）　　表 10－2

尺　寸	尺寸允许偏差		
	优等品	合格品	一等品
>200	±4	±5	±7
200～100	±3	±4	±5
<100	±3	±4	±4

（2）强度等级与密度级别

国家标准《烧结空心砖和空心砌块》（GB 13545—92）规定，烧结空心砖与空心砌块可划分为 MU5、MU3、MU2 等三个不同的强度等级和 800、900、1 100 等三个密度级别。其强度等级大小是根据每批砖中所取具有代表性的样品 10 块，分别对 5 块大面抗压和 5 块条面抗压试验所测得的强度值进行评定来确定其强度等级的。其密度级别是依据抽取 5 块样品所测得的表观密度平均值来确定的，每个密度级别根据孔洞特征与排数、尺寸偏差、外观质量、强度等级和物理性能，划分为优等品（A）、一等品（B）及合格品（C）。对于不同产品等级空心砖和空心砌块的强度等级、尺寸偏差、外观质量、物理性能、孔洞及结构、密度级别等都有具体要求，具体要求指标见表 10－3 和表 10－4。

烧结空心砖与空心砌块强度等级（MPa）　　表 10－3

产品等级	强度等级	大面抗压强度		条面抗压强度	
		平均值不小于	单块最小值不小于	平均值不小于	单块最小值不小于
优等品	5.0	5.0	2.7	3.4	2.3
一等品	3.0	3.0	2.2	2.2	1.4
合格品	2.0	2.0	1.4	1.6	0.9

烧结空心砖与空心砌块密度级别（kg/m^3）　　表 10－4

密度级别	五块密度平均值
800	≤800
900	801～900
1 100	901～1 100

（3）质量缺陷与耐久性

烧结空心砖与空心砌块的耐久性常以其抗冻性、吸水率等指标来表示，一般要求其应有足够的抗冻性，经规定的冻融试验后，对于优等品不允许出现裂纹、分层、掉皮、缺棱掉角等损坏现象；一等品与合格品只允许出现轻微的裂纹，也不许出现其它损坏现象。由于烧结空心砖与空心砌块耐久性的好坏与其内部结构、质量缺陷等有关，为保证耐久性，对于严重风化地区（通常指三北地区）所使用的烧结空心砖与空心砌块应进行冻融试验。

为确保烧结空心砖与空心砌块的质量，出厂的产品应提供产品质量合格证，其内容包括：生产厂名、产品标记、批量及编号、证书编号、该批产品实测技术性能和生产日期等，并由检验员和承检单位签章。一般情况下，进入施工现场的烧结空心砖与空心砌块应以 3 万块或不足 3 万块为一批进行抽样检验，主要检验其尺寸偏差、强度等级、密度级别和外观质

量，必要时还应进行耐久性检验。

3．烧结空心砖与空心砌块的特点与应用

与其它新型墙体材料相比，生产烧结空心砖与空心砌块的原料容易取得，工艺简单，特别是适合于一般砖瓦厂的转产和产品更新。它具有产品性能较好、生产成本低、施工方便等优点。因此，近期内烧结空心砖与空心砌块将是我国建筑工程中主要的墙体材料品种之一。

但是，目前烧结空心砖与空心砌块的强度较低，其隔热性仍较差，还不能在承重墙体结构中使用，在外墙中使用也不满足我国大部分地区对墙体保温节能指标的要求。因此，它多应用于非承重的内隔墙或室外围墙等工程中。

二、烧结多孔砖

烧结多孔砖是指含有较多小孔且孔洞率≥25%的烧结砖，一般其内孔为圆孔的孔径应≤22 mm，非圆孔的内切圆直径应≤15 mm。其传统品种的尺寸为190 mm×190 mm×90 mm（M型）和240 mm×115 mm×90 mm（P型）。其外形及尺寸见图10－2。

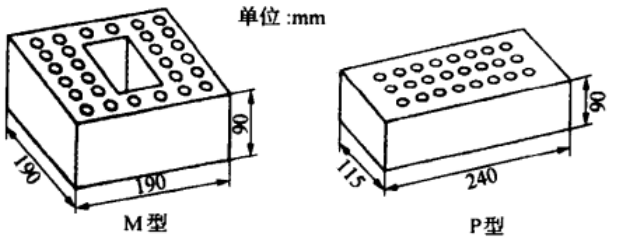


图10－2　黏土多孔砖的外形

烧结多孔砖的孔洞多与承压面垂直，它的单孔尺寸小，孔洞分布均匀合理，非孔部分的砖体较密实，具有较高的强度。国家标准《烧结多孔砖》（GB 13544—2000）的规定，根据10块砖的抗压强度可划分为MU30、MU25、MU20、MU15、MU10等五个强度等级。不同强度等级烧结多孔砖的强度应满足表10－5的要求。

烧结多孔砖的生产工艺与烧结空心砖的工艺类似，只是对原材料和成型工艺要求更为严格，影响烧结空心砖质量的因素都能影响多孔砖的质量。

依据尺寸偏差、外观质量、孔型及孔洞排数、返霜、石灰爆裂等指标，多孔砖划分为优等品（A）、一等品（B）与合格品（C）等三个产品等级。每个产品等级的尺寸偏差指标应满足表10－6的规定。此外，还对返霜、石灰爆裂、外观质量及缺陷等指标具有与空心砖相同的要求，并对优等品和一等品要求必须采用交错排列的矩形孔或矩形条孔。

烧结多孔砖的产品标示为“名称、品种、规格、强度等级、质量等级、标准编号”，如“烧结多孔砖 M 290×175×90 15 B GB13544”表示该砖为烧结煤矸石多孔砖，规格尺寸为290 mm×175 mm×90 mm，强度等级为MU15的一等品砖，符合GB 13544的标准要求。

不同产品等级烧结多孔砖的强度等级指标　　表10－5

强度等级	抗压强度平均值 $\bar{f}\geqslant$	变异系数 $\delta\leqslant 0.21$	变异系数 $\delta>0.21$
		强度标准值 $f_K\geqslant$	单块最小抗压强度值 $f_{min}\geqslant$
MU30	30.0	22.0	25.0
MU25	25.0	18.0	22.0
MU20	20.0	14.0	16.0

续表

强度等级	抗压强度平均值 $\overline{f}\geqslant$	变异系数 $\delta\leqslant 0.21$	变异系数 $\delta>0.21$
		强度标准值 $f_K\geqslant$	单块最小抗压强度值 $f_{min}\geqslant$
MU15	15.0	10.0	12.0
MU10	10.0	6.5	7.5

其中，10 块多孔砖抗压强度的标准值按下式计算：

$$f_K = \overline{R} - 1.8S$$

式中 S——10 块砖样的抗压强度标准差（MPa）；

$$S = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{10}(f_i - \overline{f})^2}$$

f_K——烧结普通砖抗压强度的标准值（MPa）；

$\overline{f}$——10 块砖样的抗压强度算术平均值（MPa）；

f_i——单块砖样的抗压强度测定值（MPa）；

强度变异系数为：$\delta = s/\overline{f}$

其强度等级的评定方法为：当变异系数 $\delta\leqslant 0.21$ 时，根据表 10－5 中抗压强度平均值与强度标准值 f_K 确定强度等级。当变异系数 $\delta>0.21$ 时，根据强度平均值与单块最小抗压强度值 f_{min} 确定强度等级。

烧结多孔砖尺寸允许偏差（mm） **表 10－6**

尺寸	优等品		合格品		一等品	
	样本平均偏差≤	样本极差≤	样本平均偏差≤	样本极差≤	样本平均偏差≤	样本极差≤
290，240	±2.0	6	±2.5	7	±3.0	8
190，180，175 140，115	±1.5	5	±2.0	6	±2.5	7
90	±1.5	4	±1.7	5	±2.0	6

由于烧结多孔砖具有较高的强度，常应用于各种承重墙体结构的砌筑。对于有些隔热性较好的烧结多孔砖，可用作我国部分地区或部分建筑的外墙砌筑。但对于有些要求保温性更高的地区或建筑，烧结多孔砖尚不能完全达到节能要求，还应结合其它保温措施才能满足国家规定的要求。

为确保烧结多孔砖的质量，出厂的产品也必须提供产品质量合格证，并且对于进入施工现场的烧结多孔砖应以 3.5～15 万块或不足 3.5 万块为一批进行抽样检验，主要检验其尺寸偏差、强度等级和外观质量，必要时也应进行耐久性检验。

第二节 新型复合板材

为满足工程对材料多种性能的要求，利用复合材料已成为今后发展的必然趋势，目前工程中已经开始大量应用各种复合板材，并取得了良好的效果。

一、钢丝网水泥类夹芯复合板材

它是以两片钢丝网将聚氨酯、聚苯乙烯、脲醛树脂等泡沫塑料、轻质岩棉或玻璃棉等芯

材夹在中间，两片钢丝网间以斜穿过芯材的之字形钢丝相互连接，形成稳定的三维桁架结构，然后再用水泥砂浆在两侧抹面，或进行其它饰面装饰。

钢丝网水泥夹芯复合板材充分利用了芯材的保温隔热和轻质的特点，两侧又具有混凝土的性能，因此在工程施工中具有木结构的灵活性和混凝土的表面质量。

常用的钢丝网夹芯板材品种有多种，但基本结构相近，图 10－3 为钢丝网水泥夹芯复合板材的结构示意图。

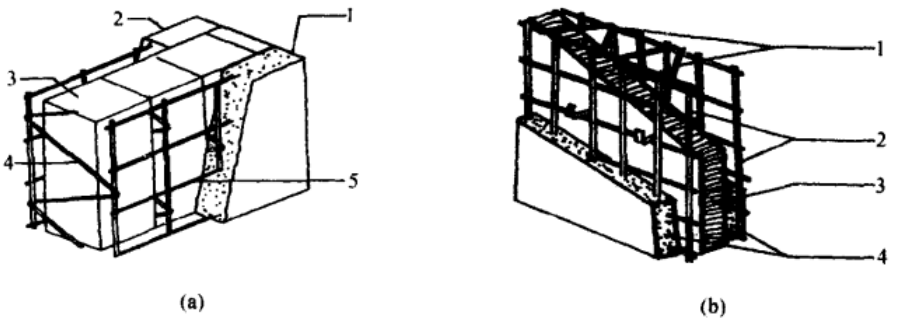


图 10－3　钢丝网水泥夹芯复合板材结构示意图

（a）水泥砂浆泡沫塑料复合板　　（b）水泥砂浆矿棉复合板

1—外侧砂浆层；2—内侧砂浆层；　　1—横穿钢丝；2—钢丝网片；

3—泡沫塑料层；4—连接钢丝；5—钢丝网　　3—矿棉板；4—内外砂浆层

通常这种板材抹灰后的自重约为 90 kg/m^2，其热阻约为 24 cm 普通砖墙的两倍，具有良好的保温功能；这类板材还具有隔声性好，抗冻融性能好，抗震能力强和建造能耗低等优点。为改善这种板材的耐高温性，可用矿棉代替泡沫塑料，制成纯无机材料的复合板材，使其耐火极限达到 2.5 小时以上。它可用作墙板、屋面板、各种保温板材料，适当加筋后具有一定承载能力，用于屋面时，还是集保温、防水和自承重的多功能材料。

二、彩钢夹芯板材

彩钢夹芯板材是以硬质泡沫塑料或结构岩棉为芯材，在两侧黏上彩色压型（或平面）镀锌钢板，其中外露的彩色钢板表面涂以高级彩色塑料涂层，使其具有良好的耐候性和抗腐蚀能力。其结构示意如图 10－4。

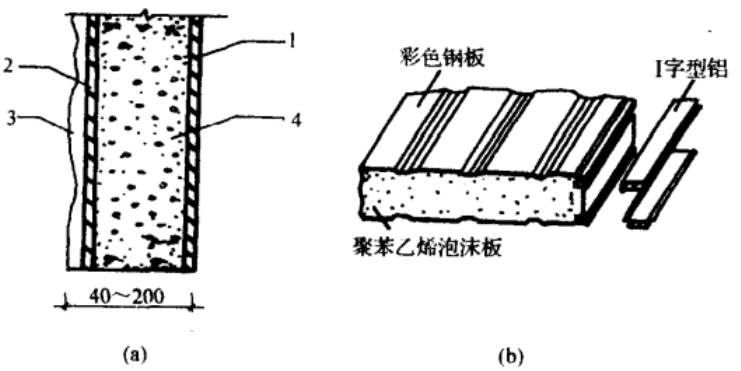


图 10－4　彩钢夹芯板材

（a）彩钢夹芯平复合板　（b）彩钢夹芯压型复合板

1、2—彩色镀锌钢板；3—涂层；4—硬质泡沫塑料或结构岩棉

这种板材重量轻，一般每平米 15～25 kg；导热系数低，约为 0.010～0.30 W/m·K；使用温度范围为 －50 ℃～120 ℃。由于它加工精确，结构合理，板间连接密封良好，消除了冷桥，具有良好的隔音和密封效果，还具有良好的防潮、防水、防结露和装饰效果。当采用结构岩棉为芯材时，还有良好的耐火性能。彩钢夹塑板材还具有易安装和移动的优点，适于大型公共建筑的墙体，原有楼房的接层，各种厂房和办公用房的墙体和屋面。

第十一章　建筑防水材料

土木建筑工程中有许多部位需要进行防水处理，如屋面、地下或水工构筑物的基地、顶面与侧墙、桥面及路面。这些部位离不开防水材料。

工程中常用的防水材料很多，有覆面瓦等刚性防水材料、金属或塑料屋面板、高分子防水卷材、防水涂料或油膏等。此外，还有防水混凝土及防水砂浆等结构防水材料。

第一节　屋面刚性防水材料

一、黏土瓦

黏土瓦是传统坡形屋面的防水材料，与其它防水材料相比，它施工方便，成本低，防水可靠，耐久性好。因此，千百年来一直是住宅、公共建筑和其它建筑工程中主要的屋面防护覆面材料。

黏土瓦的主瓦类型有平板瓦、槽形瓦、S形瓦、鳞形瓦、小青瓦等。根据外观指标，黏土瓦划分为一等品和二等品。其主要要求见表 11－1。

黏土平瓦的质量等级划分　　**表 11－1**

项　　目	指　　标	
	一等	二等
1. 有效尺寸允许偏差不得超过：		
长度	±7 mm	
宽度	±5 mm	
2. 翘曲不得超过	4 mm	
3. 裂纹		
实用面上不得有贯穿裂纹	不允许	不允许
实用面上非贯穿裂纹长度不超过	30 mm	50 mm
搭接处上的贯穿裂纹	不允许	不得延伸入搭接部一半
边筋	不允许断裂	不允许断裂
4. 瓦正面的缺棱掉角（损坏深度小于 4 mm 者不计）长度不得超过	30 mm	45 mm
5. 边筋和瓦爪的残缺：		
边筋的残留高度不低于（mm）	2 mm	2 mm
后爪	不允许	允许一爪缺不高于 1/3
前爪	允许一爪缺不高于 1/3	允许二爪缺不高于 1/3
6. 混等率（本等级中混入次级产品的比例）不得大于	5%	

黏土瓦的规格尺寸为 400 mm×240 mm～360 mm×220 mm，脊瓦的长度大于 300 mm，宽度大于 180 mm，高度为宽度的 1/4。常用平瓦的单片尺寸为 385 mm×235 mm×15 mm，其有效面积为 0.064 4 m^2，实际面积为 0.090 5 m^2，每平方米需挂瓦 16 片。通常每片瓦干重 3 kg，湿重3.3 kg。

国家标准规定，每平米吸水后的重量不得超过 55 kg，单片平瓦的最小抗折荷重不得低于 600 N，单片脊瓦的最小抗折荷重不得小于 700 N。

在某些特殊环境（受冻融或水浸泡等）下使用时，应对瓦的耐久性进行检验。合格的瓦在经冻融试验后不得产生分层、开裂等现象。

黏土瓦的生产方式与黏土砖相近，差别之处在于它需要原料的塑性更好，制成的瓦坯须用瓦托晾干。在仿古建筑中还可以采用琉璃瓦。它是在黏土瓦坯上涂以釉料，经焙烧后使表面渗入鲜艳的颜色，并对瓦表面起保护作用。通常琉璃瓦表面透明有光泽，具有豪华的外观。

二、彩色水泥瓦

彩色水泥瓦是以水泥砂浆为原料经压制或挤压与切割、覆面上色和养护生产的非烧结瓦。它可以制成各种颜色，由于瓦上表面覆涂复合涂层，使其表面抗风化能力提高，不仅具有优良的装饰效果，也有较好的耐久性。

目前生产的水泥彩瓦多为仿欧式的外形，其主瓦有大波瓦、小波瓦、水波瓦。与之配套的有脊瓦、檐口瓦、封头瓦及排水瓦等。这类瓦主要依靠横向压扣连接和密封防水，适于 17°～35°的屋面坡度覆面。当屋面坡度较大时，可将瓦上的盲眼穿透以连接件使上下瓦之间连接，并与龙骨联结，使其形成整体联结，具有可靠的防水效果。

其主瓦的规格为 420×332 mm，每平米约需要 10 片，每片重 3.5～4.5 kg。单片抗折荷载为 1 kN 以上。

水泥彩瓦的单片尺寸较大，可以直接搭在屋面龙骨上。由于它配套规格较全，使得施工方便，建筑物整体外貌漂亮，具有类似琉璃瓦装饰的效果。水泥彩瓦的主要规格形状见图 11－1。

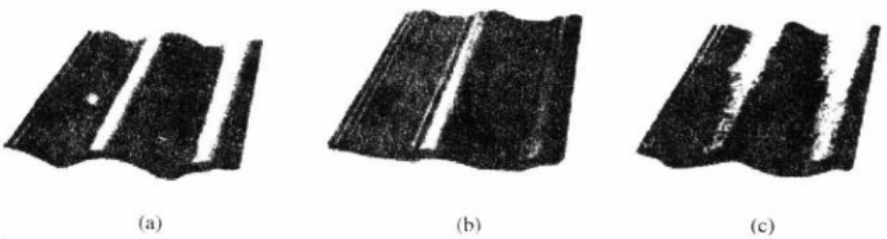


图 11－1 水泥彩瓦的外形

（a）大波瓦　（b）小波瓦　（c）水波瓦

三、异形屋面防水板材

除上述瓦外，还可使用玻璃纤维增强水泥波瓦及其脊瓦、石棉水泥波瓦及其脊瓦、玻璃纤维增强树脂波瓦及其脊瓦、金属压形防水板材等大面积防水板材。

在许多大型仓库、工业厂房和其它公用建筑中，经常采用金属屋面。常见的金属屋面有镀锌钢板、复合铝板、彩色压型钢板、彩钢复合板材等屋面材料。

对于一些要求单位面积很轻的屋面可以采用镀锌钢板，如简易仓库、车棚、市场等。它

具有安装方便和成本低等优点，对一些不要求保温的建筑可以采用。

在许多大开间的礼堂及体育场馆，常采用铝合金波纹板、铝合金压型板、复合铝板平板、铝合金板夹层板等屋面材料。

彩色压型钢板具有较好的刚度、强度与装饰效果，可以制成坡屋面、平屋面或拱（弧）形屋面，特别是压型钢板拱形屋面可以省去支撑梁、檩和龙骨等，形成自身承重结构。彩钢复合板材的结构与图 10－5 的彩钢夹芯墙板相同，它具有良好的保温隔声效果，自身有很强的刚度，可以直接作为建筑物的屋面而无需进行保温与装饰处理，是大型工业厂房、仓储用房、大型市场和棚亭较理想的屋面材料。

第二节　高分子防水材料

一、高分子防水卷材

沥青及沥青油毡是传统的有机高分子防水材料，随着技术进步和社会要求的提高，传统的沥青类防水材料已不适应建筑工程对防水的要求，因此产生了品种繁多的有机高分子防水材料。目前工程中较常用的防水材料有橡胶或树脂改性沥青防水材料、橡胶系防水材料、塑料系防水材料及橡塑共混型防水材料等。

1．SBS 改性沥青防水材料

以 SBS 弹性沥青为主要材料可以生产弹性体或塑性体防水卷材、防水胶等防水产品，它们是以沥青、热塑性丁苯橡胶（SBS）、橡胶、合成树脂、表面活性剂等高分子材料制成的，也可以制成水乳性沥青防水材料。为增强防水卷材的抗拉能力还应加入玻璃纤维、复合玻璃布、复合聚酯布或亚麻布等作为胎体，提高卷材的抗变形能力。

与普通沥青防水材料相比，SBS 沥青防水材料低温柔韧性能、抗裂性能和黏结性能更好，施工操作方便灵活，适于各种建筑物的表面与地下防水，防水性能好，而且对环境无污染。因此，目前 SBS 改性防水材料已成为建筑工程中廉价可靠的防水材料，在工程中得到了广泛的应用。SBS 改性沥青防水材料的主要性能见表 11－2。

SBS 改性沥青防水材料的主要性能　　表 11－2

项　目	测 试 条 件	指　标
外　观		黑色黏稠液体
固体量		≥50%
黏结性	与水泥板的黏结强度	≥0.3 MPa
低温柔韧性	在－20±2℃下，绕直径 3 mm 金属棒半周	涂膜无裂纹或剥落现象
耐热性	在 80±2℃下，试件垂直放置恒温 5 h	不流淌
抗裂性	20±2℃，厚 0.3～0.4 mm 涂膜可覆盖基层的裂缝宽度	≤1.0 mm
不透水性	20±2℃，0.1 MPa 动水压下，恒压 30 min 或 Φ60 mm 玻璃管中 40 mm 静水压下 7 d	不透水
人工老化	水冷氙灯照射 300 h	无异常
耐碱性	20±2℃，饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液浸泡 15 d	无异常
耐酸性	20±2℃，1% H_2SO_4 溶液中浸泡 15 d	无异常
耐湿热性	湿度 90%，温度 35～40℃20 d	无异常

通常SBS防水卷材可制成覆（PE）膜光面、覆（PE）膜压纹、细砂、彩砂、岩片、铝箔等表面，它们的作用是防止卷材贮运中自相粘连，阻止紫外线的直接照射，并改善防水表面的外观。

根据SBS改性弹性沥青防水卷材的10 m^2 标称重量划分为25号、35号、45号、55号等四种标号。通常25号卷材的单卷面积为10 m^2，标称重量25 kg；35号卷材的单卷面积为10 m^2，标称重量35 kg；45号卷材的单卷面积为7.5 m^2，标称重量45 kg；55号卷材的单卷面积为5 m^2，标称重量55 kg。根据卷材的可溶物含量、不透水性、耐热度、抗拉力、柔度等指标，划分为优等品、一等品与合格品。其中耐热度是依据受热2 h后涂盖层无滑动时可承受的温度来确定的，我国北方地区常选用100 ℃，南方地区常选用90 ℃。柔度是指卷材3 s时间内绕棒180°时不产生裂纹的耐低温性能，我国北方地区常选用－15 ℃、－20 ℃、－25 ℃的卷材。

SBS改性沥青防水材料主要适用于建筑物的屋面、地面、卫生间、地下室、各种构筑物的大面积防水。

膏状SBS改性沥青大量用于现场冷作业铺贴玻璃丝布防水层时，可加入纤维或粉状材料制成油膏用于嵌缝处理。最好在其表面层未硬化前撒一层石粉或云母粉，以便改善其耐久性。SBS改性沥青防水油膏主要适用于各种建（构）筑物伸缩缝的防水，旧建（构）筑物的嵌缝修补等。

SBS改性弹性体沥青防水材料应在5 ℃以上施工，其膏状体不得现场兑水，不得在负温下或曝晒下储存，一般储存期3～6个月。

2．三元乙丙橡胶防水卷材

三元乙丙橡胶防水卷材（简称EPDM）是以三元乙丙橡胶为主料，加入适量丁基橡胶、硫化剂、促进剂、活化剂、增塑剂及填充料等，经密炼、挤出（或延化）、硫化等工序制成的防水卷材。

与其它高分子防水卷材相比，三元乙丙橡胶防水卷材的耐候性与耐臭氧性更好。因为三元乙丙橡胶分子结构中的主链上没有双键，少数的双键仅存在于支链上，而其它类型橡胶分子结构的主链上一般都有双键；所以当受到臭氧、光、热、湿的作用时，三元乙丙橡胶分子结构的主链不易断裂，表现出比其它橡胶高分子材料更好的抗老化能力。

三元乙丙橡胶防水卷材具有优良的防水性、较好的耐腐蚀性。它的使用温度范围也很宽，可在－40～80 ℃的范围内长期使用。三元乙丙橡胶防水卷材的拉伸强度高（可达8 MPa），弹性与延伸性也很好，因此对基层的伸缩或开裂适应性很好。它主要采用冷施工，有胶黏型和自黏型等不同的产品，可适合于各种不同环境与要求的工程。

根据三元乙丙橡胶防水卷材不同温度时的抗拉强度、扯断伸长率、直角型撕裂强度，以及抗热空气与耐臭氧老化能力、耐碱性、耐低温性、不透水性、加热伸缩性、黏合性能等技术指标，可划分为一等品或合格品。对不同产品等级的三元乙丙橡胶防水卷材都有相应的要求。

三元乙丙橡胶防水卷材可制成各种色彩的外表，可适用于建筑屋面、地下室、卫生间的外露或隐蔽防水。

二、防水涂料

1．聚氨酯防水材料

目前常用的聚氨酯防水材料是以聚氨基甲酸酯为主要成分的双组分反应固化型防水材

料。其主要组分是含有端异氰酸酯基的聚氨酯预聚物，还含有多羟基的固化剂、增韧剂、增黏剂、防霉剂、填充剂、稀释剂等。当主料与辅料按比例混合均匀后，可在常温下形成黏稠状物质，待涂布施工完毕后，可常温固化形成柔软、耐水、抗裂和富有弹性的整体防水涂层。未来将更多的采用单组分聚氨酯防水涂料和水溶性聚氨酯防水涂料。

聚氨酯防水材料划分为自流平型（L）和非下垂型（N）。根据聚氨酯防水材料的密度、适用期、表干时间、渗出性指数、流变性、低温柔性、黏结性、恢复率、抗拉-压循环性等指标，划分为优等品、一等品、合格品。

L型聚氨酯涂膜防水材料特别适合于要求较高弹性与延伸能力的工程防水，如各种建（构）筑物的地面、地下防水，水工构筑物防水，基层容易变形或开裂的结构物防水等。N型聚氨酯密封膏防水材料主要应用于各种结构的联接缝密封防水或结构物裂缝的防水修补。

聚氨酯防水材料的主要组分（A）与辅助组分（B）多以桶装，应在阴凉处存放，其贮存期为6个月。A组分具有一定的毒性，在使用时应注意通风与防护。

2．水乳型再生胶沥青防水涂料

它是以表面活性物质为乳化剂，使加热液化沥青在水中乳化制成的乳液再加入再生橡胶粉改性后的水乳型防水涂料。其中再生橡胶是以废橡胶制品为原料经切割、洗涤、粉碎和脱硫（使硫脱链成小聚合体）制成的弹性细粉。

在水乳型再生胶沥青防水涂料中，沥青与再生橡胶粉具有良好的相溶性，在干燥成膜过程中，沥青与橡胶相互结合成防水膜。该防水层中橡胶的高弹性与耐温性克服了沥青热稳定性差的缺点，保持了沥青良好的黏结性和憎水性良好的优点。使该复合体具有优良的弹性、黏结性、不透水性，较好的耐热、耐低温性和耐老化性；还具有冷作业，方便施工，操作安全的优点。该防水涂料与玻璃布、合成纤维薄毡、无纺布等复合使用还可使该防水层具有一定抗拉伸能力，为提高其抗老化能力，常在其外露表面撒布细砂作为保护层。

该防水涂料可应用于各种建筑的屋面、地下室、冷库、墙面、刚性及柔性防水的翻修等方面。它多以桶装供货，要求储存和使用温度必须高于0℃，当桶内上表面有结膜时应进行过滤后使用。施工完毕后应进行干燥结膜5～7 d后方可上人或堆物。

工程中对水乳型再生胶沥青防水涂料要求的主要技术指标有耐热性、胶黏性、抗裂性、低温柔性、不透水性、耐碱性等。

此外，近年来我国相继开发了高分子基水泥复合弹性防水材料、聚合物水泥基防水材料、丙烯酸基弹性防水材料、硅橡胶弹性防水材料、其它橡胶改性防水材料等。

第十二章　建筑装饰与保温材料

第一节　建筑装饰材料

在许多土木建筑工程中，为保护建筑物的主体结构不受外界的侵害，改善其外表美观效果，或弥补其外观缺陷，通常采用表面装饰材料来覆盖建筑物的表面。此时，工程中经常采用的装饰材料有以下几类。

一、涂刷类装饰材料

对于只要求改变建筑物的表面美观效果，或对表面装饰的寿命要求较短的建筑装饰，可以采用涂刷类装饰材料。涂刷类装饰材料具有成本低、施工方便和速度快、不增加建筑物荷载等优点，可广泛应用于各类工程的装饰处理。工程中所采用的涂刷类装饰材料统称为涂料，常用的涂料有以下几类。

1．油漆

油漆是土木建筑工程中采用较早的涂刷装饰材料，它主要用于木结构、钢及其它金属结构的表面装饰。油漆的品种有很多，根据其形成可分为天然漆和人工合成漆。

天然漆使用性能优异，但耐环境侵蚀能力差，而且其来源受限制，成本也较高，主要应用于一些室内的高级装饰。

人工合成漆又分为调和漆、清漆、磁漆、光漆、喷漆、防锈漆等不同性能与用途的漆。其中调和漆是由干性油、颜料、溶剂及其它辅助料等调和而成的。其质地均匀，稀稠容易调整。形成的漆膜耐环境侵蚀能力强，是工程中较为常用的油漆。

2．建筑涂料

（1）建筑涂料的构成及其对性能的影响特点

建筑涂料是由成膜物质、填料、颜料、溶剂和助剂等组成的均匀混合物。其中成膜物质是主要成分，它在涂料凝固后起黏结作用，可使涂料与基层材料牢固地黏附在一起，并使其它组分相互黏结成均匀、坚固的保护膜层。常用的成膜物质有两类：有机类和无机类。

常用的有机类成膜物质多为各种树脂，如聚乙烯醇系缩聚物、丙烯酸酯及其共聚物、氯乙烯－偏氯乙烯共聚物、环氧树脂、聚氨酯树脂、氯磺化聚乙烯等。它们具有成膜后强度高，耐水性好，耐腐蚀能力强、表面光泽好等优点。但大多具有耐高温差，耐久性欠佳，易产生老化等缺点。

常用的无机类成膜物质主要有水泥浆、硅溶胶、磷酸盐系、硅酮系、碱金属硅酸盐及其它无机聚合物等。它们具有耐高温、耐久、抗老化、成本低等优点。但多数有耐水性差、光泽度差、黏结力小或耐腐蚀性差等缺点。

溶剂在涂料中起稀释其它成分并使之达到均匀分布的目的，它对涂料内各种成分分布的均匀性和涂刷质量起关键作用。常用的溶剂也有无机与有机两大类。有机溶剂主要有酒精、汽油、苯、二甲苯、松香水、丙酮、三氯乙烯等。它们具有溶解能力强、挥发快、成膜表面

密实等优点。有机溶剂具有浪费资源、成本高、污染环境、易燃、要求基层干燥等缺点，为此世界各国均限制生产和使用以上有机物为溶剂的涂料。

无机溶剂主要是指水，以水为溶剂的涂料称为水性涂料。当以亲水性物质作为成膜物质时，可制成水溶性涂料。当以憎水性材料作为成膜物质时，可通过乳化制成乳液，形成乳胶涂料。利用水为溶剂生产的涂料具有成本低、节约资源、不污染环境、不易燃等优点，属于绿色类建筑材料，备受各国推崇。但是，水性涂料大多数有耐水性差、抗腐蚀能力差、与基层黏结力较小、表面不够致密等缺点。

(2) 建筑涂料的品种与应用

不同的建筑涂料适于不同的条件和环境，包括施工条件和环境、使用条件和环境等。通常应根据建筑物表面的状态、环境条件、使用寿命和使用要求等方面来选择不同的建筑涂料。

二、涂抹类装饰材料

涂抹类装饰材料是指将黏稠胶凝材料涂抹在建筑物的表面，使其与建筑结构黏结在一起，并形成表面装饰层的材料。对于建筑物结构表面较粗糙，需要较厚装饰覆盖层的装饰工程可以采用涂抹类装饰材料。常用的涂抹类装饰材料有各种腻子、装饰混凝土、装饰砂浆、装饰灰膏等。

1. 装饰混凝土

水泥混凝土不仅是一种耐久性良好的结构材料，而且可以是装饰或装修性能优良的材料，因为混凝土的制作原料、工艺和形状容易控制，通过改变这些因素可以使混凝土的外观和内在物理性能千变万化。混凝土装饰与装修的优点还在于它的成本低，耐久性好，可以集多种性能于一体，因此一直得到广泛应用。目前，常见的装饰混凝土有以下几类。

(1) 清水装饰混凝土

清水装饰混凝土是利用混凝土的本色和模制外观作为装饰的混凝土。在有些工程中，为充分显示混凝土坚实的质感，并获得耐久与经济的效果，可以采用这种装饰方法。在许多钢筋混凝土桥梁工程、园林建筑和其它建筑中经常采用这种装饰手段。

这种装饰的施工操作必须精细，通常对所用模板、混凝土的质量要求十分严格，使拆除模板后的混凝土表面保持很好的平整度，不能有明显的黏模斑痕和色泽差别。

(2) 色彩装饰混凝土

普通水泥混凝土多为灰色外观，为改变这种单调的颜色，可以采用白色水泥、彩色水泥、彩色集料等改变颜色，达到所期望的外观效果。考虑彩色混凝土的成本较高，建筑整体采用彩色混凝土的情况很少，多采用表面装饰或彩色预制品黏贴等方法。

常采用的色彩装饰混凝土有，白色混凝土墙面、栏杆及雕塑；彩色混凝土墙面、屋面、现浇地面；彩色混凝土地面砖、花格砖等。这些彩色混凝土在装饰效果方面自然、庄重，给人以粗犷坚实的感觉；而且其色彩耐久性好，能抵抗大气环境的各种腐蚀作用，即使表面因风化脱层也会保持基本一致的颜色。

色彩装饰混凝土和清水装饰混凝土对混凝土表面泛霜十分敏感，对于碱含量较高或原材料中可溶物含量较高的混凝土不适宜，对于掺加外加剂的混凝土应慎用。

(3) 质感装饰混凝土

通过改变表面质感，改善混凝土的外观效果也是混凝土装饰的常用手法。它可以以普通水泥或彩色水泥混凝土为基本材料，通过改变表面外观，给人以不同于一般混凝土的质感，

获得所期望的装饰效果。

工程中常用的质感装饰方法有劈离石表面、露集料表面、仿蘑菇石、仿木纹、仿面砖等。

(4) 图案装饰混凝土

利用表面图案可以掩饰混凝土单调的外观，优美的图案还可以产生良好的装饰效果。由于混凝土的可塑性，其表面图案很容易制作，而且很容易改变局部颜色。

常用的图案装饰混凝土方式有板缝处理装饰、线条装饰、浮雕装饰、艺术字装饰等。

(5) 水泥细石渣装饰

水泥细石渣装饰是以水泥和细石渣为主要原料配制而成特种混凝土，由于其中不含有细集料（砂），所用集料均为细石子，可产生特殊的装饰效果。工程中常用的有水磨石、斩假石、剁斧石、水刷石、干黏石等表面装饰方法，所用石子有 8 mm、6 mm、4 mm 和 2～6 mm的不同粒径。

a. 水磨石：在洁净的基层上按要求黏贴分格条（铜条、铝条或玻璃条），先在基层表面刮一薄层水泥浆，然后抹水泥，彩色石子约为 1:2.5 的水泥石子浆，其厚度以略高于分格条为宜，并抹平压实。养护 1～2 d 后进行表面磨光，此时可以将表面的水泥浆和石子的角棱磨去，露出大量的石子剖面。若表面有砂眼、孔洞，应及时用相同颜色的水泥浆进行修补。磨光第一遍 3～5 d 后再进行细磨，待达到要求后用草酸进行浸润，并用油石研磨，磨掉石子剖面的污渍，用清水冲洗干净。晾干后的水磨石表面再打 2～3 遍地板蜡。

b. 水刷石：在洁净的建筑物表面上直接抹一定配比的水泥彩色石子浆，并压实抹平。待水泥初凝后，用硬毛刷蘸水刷洗，或喷水冲洗，使表层的水泥浆层被冲掉，使石渣半露出来，获得彩色石子的装饰效果。水刷石特殊的质感和石子的色彩使得混凝土表面装饰效果改善。由于石子的耐久性很好，还使其装饰效果得以长期不变，具有更好的耐久性。

c. 剁斧石：在基层上抹一定厚度的水泥彩色石子浆，待水泥浆硬化达到一定强度后，用钝斧、凿子等工具按要求进行表面雕琢，使部分表面水泥浆被剔除，形成类似经加工后天然石材表面的纹理。它给人以质地坚实和表面细腻的感觉，并且具有良好的外观耐久性。由于其雕琢工作量太大，对大面积施工可以在强度很低时用锯齿拉划，也能产生类似的效果。

d. 干黏石：建筑物表面基层上先抹一层普通水泥浆或聚合物水泥浆，在水泥浆凝结之前将过量的彩色石子黏（撒或甩）到水泥浆表面，经压实和硬化后，彩色石子被水泥浆牢固黏结，形成了类似水刷石的效果。

2. 装饰砂浆

装饰砂浆主要是大面积涂抹在墙、柱、梁或天棚的表面，起填充、找平与装饰的作用，其功能是保护结构主体免遭各种侵害，提高结构的耐久性，改善结构的外观。因为足够的黏结能力是保证与基层牢固黏结的基本条件，所以对砂浆的要求主要是良好的和易性、足够的黏结能力，对强度的要求并不高，对和易性的要求主要是流动性和保水性，以方便涂抹和阻止泌水对表面的污损。

由于砂浆成本低，使用方便，在新建建筑或旧建筑翻修中得到了广泛应用。根据所用材料和操作方式不同，装饰砂浆的类型有多种，为建筑装饰装修的多样化提供了良好的物质条件。普通抹面砂浆的有关知识已在第六章介绍，这里只介绍其它装饰砂浆。

(1) 彩色装饰砂浆

通过改变砂浆的颜色也可以获得某种装饰效果。常用彩色装饰砂浆主要有涂抹彩色砂

浆、彩色喷涂砂浆、滚涂彩色砂浆、弹涂彩色水泥浆等。涂抹彩色砂浆的配比和工艺与普通抹灰砂浆类似。

彩色喷涂砂浆是利用喷浆机械将1:1:4（常加入适量有机改性材料和颜料）的彩色水泥砂浆喷涂在基层表面上，待砂浆凝结后再在其表面喷涂一薄层抗污染的疏水处理涂料。根据所用砂浆配比或喷涂方式的不同，可以形成表面波纹状、颗粒麻面状或彩斑花点状等外观。

滚涂彩色砂浆是先在基层表面抹一层聚合物水泥砂浆，在水泥终凝之前用辊子滚出花纹，待砂浆产生一定强度后表面罩一薄层耐污染的疏水涂料。

弹涂彩色水泥浆是先在基层表面涂刷一道彩色聚合物水泥浆，色浆硬化后以专用筒形弹力器分别将各种色浆间隔基本均匀地弹到表面上，形成不同颜色、深浅和大小的圆形色点相互衬托。彩色水泥斑点硬化后再罩一层抗污染的疏水涂料。

（2）砂浆表面加工装饰

为改善外观装饰效果，砂浆抹面后可以进行搓毛、扫毛、拉条、仿石材或假面砖处理，从而获得表面纹理，或粗细相间的表面，获得一定仿天然石材的装饰效果。

基层进行素水泥浆罩面后，可以进行拉毛处理，形成凹凸和斑痕的装饰表面。在硬化基层表面进行甩毛处理，就是用竹刷蘸不同色彩的水泥浆向基层甩水泥斑点，可以形成花色云斑的装饰效果。

还可以在结构物上用砂浆模制成规则块状的表面凸出仿蘑菇石，使得结构物表现出与天然料石相同的外观，给人以粗犷坚实的感觉。

此外，土木建筑工程中还可以采用石灰麻刀、石膏等膏状胶凝材料进行表面装饰。

三、贴面类装饰材料

贴面类材料是指在黏贴或连接在建筑物表面，达到保护和装饰建筑物目的的材料。对于有些建筑物或其中某些部位的装饰，采用涂刷或涂抹类装饰难以达到所需要的效果，此时可以采用贴面类材料。工程中可采用的贴面材料有织物类、木材类、金属类、塑料类、人造石材类等装饰材料。对于要求耐久性较好的室外装饰多采用人造石材类装饰材料。为此这里主要介绍人造石材类装饰材料。

水泥和混凝土等均为人造石材，虽然它们的历史并非久远，但由于它们的应用已十分广泛，其性能也早已为人们所熟悉，通常将其认为是普通人造石材。随着技术的不断进步，近几年来许多种新型人造石材在土木建筑工程中的应用越来越广泛。

1．陶瓷材料

陶瓷是由适当成分的黏土经成型及烧结而成的较密实材料。尽管我国陶瓷材料的生产和应用历史悠久，但在土木建筑工程中的大量应用，特别是陶瓷材料的性能改进只是近几十年的事情，因此陶瓷材料也可看作是土木建筑工程中的新型人造石材。

（1）陶瓷材料的分类和制作

根据陶瓷材料的原料和烧结密实程度不同，可分为陶质、炻质和瓷质三种性能不同的人造石材。生产陶瓷的原料中主要含有氧化硅、氧化铝及少量其它金属氧化物和杂质等。其主要生产工艺为：

选料配料→调制成型→干燥→烧结→成品

当原料中含有杂质较多，且调制的坯料较稀时，多以塑性成型，它在干燥和烧结过程中的收缩较大，所需烧结的温度较低，形成的成品密实度较差，这种材料为陶质材料；当原料中含有的杂质很少，且调制的坯料较干时，多以压制成型，它在干燥和烧结过程中的收缩很

小，所需的烧结温度很高，形成的成品密实度很大，这种材料为瓷质材料；当上述性能介于陶质材料和瓷质材料之间时为炻质材料。

一般陶质材料的孔隙率较高，吸水率也较高，通常大于10%，炻质材料的吸水率为1%～8%，瓷质材料的吸水率通常小于1%。

为改善陶瓷材料表面的机械强度、化学稳定性、热稳定性、表面光洁程度和装饰效果，降低表面吸水率，提高表面抗污染能力，可在陶瓷材料的表面覆盖一层玻璃态薄层，这一薄层称为釉料。此釉料中含有大量的低熔点物质，它是专门调配和磨制成釉浆，将此釉浆涂覆在陶瓷坯体表面或未经上釉的陶瓷制品表面上，再经焙烧使釉料在陶瓷制品表面形成十分致密的玻璃质釉层。这种陶瓷材料为釉面陶瓷材料，其基体多为陶质材料。

(2) 常用陶瓷材料的品种

根据陶瓷材料的原料杂质含量不同，制作工艺不同和烧结程度不同，建筑用陶瓷材料可分为以下几类：

a. 陶瓷锦砖（玛赛克）

它是以含杂质极少的纯瓷土磨细制成泥浆，经脱水干燥后，用半干法压制成型，再经充分焙烧而成。它是普通建筑陶瓷中烧结程度最高的材料，质地致密，属于瓷质材料。陶瓷锦砖烧结过程中的变形大，通常只能制成小尺寸产品，其形状有正方形、长方形、六边形等，边长一般不大于40 mm。为使用方便，在工厂先按设计图案将陶瓷锦砖反贴在牛皮纸上，每张为一联，使用时按联黏贴，待被黏结牢固后将牛皮纸浸水脱掉。

根据陶瓷锦砖的使用要求和技术特点，一般要求的技术指标有尺寸偏差、吸水率（应小于0.2%）、抗压强度（15～25 MPa）、耐急冷急热性、耐酸碱性及成联质量等。

陶瓷锦砖具有抗压强度高、质地坚硬、耐磨、耐水耐腐蚀、耐污染、抗冻、抗火等优点，适于使用条件要求较高的地面、墙面和其它部位的表面铺贴，具有良好的耐久性。

b. 陶瓷墙地砖

陶瓷墙地砖是以含杂质较少的瓷土为原料，经半干压制法成坯，再经较充分焙烧制成的陶瓷材料。有的墙地砖还上釉，可制成各种各样表面质感的外观或印刷各种图案。陶瓷墙地砖的内部质地差别较大，一般比较致密，属炻质或陶质材料。

工程中对陶瓷墙地砖的技术要求指标主要有尺寸偏差、表面质量、变形、物理力学性能等。一般其吸水率不得大于10%，能经受20次的冻融循环，有一定的耐急冷急热能力和耐腐蚀性，抗弯强度不得低于24.5 MPa，根据其耐磨性可分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ等四个等级。

陶瓷地砖的厚度一般大于墙砖，它们对基体材料具有良好的保护作用，因此可应用于各种工程的地面和墙面的装饰和防护，是一种物美价廉，且耐久性良好的贴面材料。

c. 陶瓷釉面砖

陶瓷釉面砖是以含有较多杂质的可塑性黏土为主要原料，加水调制成坯料，经压制成坯，再经干燥、素烧、施釉、釉烧等工艺制成的产品。由于该砖成型时含水较多，压实不足，烧结程度较差，为陶质材料，所以其质地较疏松，吸水率较大，物理力学性能较差，表面必须施釉以提高其表面的致密性，改善物理力学性能。

工程中对釉面砖的技术指标要求主要有外观质量和尺寸偏差，对其物理力学性能的要求吸水率不大于21%，抗弯强度不得小于16 MPa，有一定的耐急冷急热能力。

因为釉面砖的吸水率大，抗冻性差，不适于受冻或温湿度变化较大的环境中使用，通常应用于各种房间的室内饰面。

d. 卫生陶瓷

卫生陶瓷是以含有较多杂质的可塑性黏土为原料，加水调制成浆料，塑性模制而成要求的形状，经干燥后表面施釉，再经烧结制成的产品。虽然卫生陶瓷的内部吸水率很大，但经表面施釉后性能大为改善，其成品的吸水率一般不大于3.5%，且表面光洁。

因为卫生陶瓷的体积较大，干燥和烧结中易变形，所以对其质量要求主要是形状尺寸和外观质量。卫生陶瓷产品主要包括洗面器、洗涤器、大便器、小便器、水槽水箱及各种配件等。

2. 熔融制品

火成岩性能优良，为取得相似的性能，可将某些矿物高温熔融后冷却制成所需要的制品，其性能与天然石材相近。

(1) 普通玻璃

玻璃是以石英砂及强碱化合物等矿物质为原料，经粉碎、筛分、配料、混合、高温熔融、成型、退火、冷却、切裁和加工等工艺制成的产品。根据强碱化合物的种类不同可分为钠玻璃或钾玻璃。

玻璃具有表面晶莹光洁、透光、透视、保温、隔热、隔声、耐磨、耐气候变化、材质稳定和抗压强度高等优点。除此之外，经过加工后的玻璃还具有优良的装饰性，与其它材料复合后可产生优异的性能。

平板玻璃通常用于门窗和隔断，技术指标要求主要有外观质量和光学性能。经过夹丝、夹层或钢化处理的玻璃具有良好的物理力学性能，可应用于受不同外力的工程结构中，并且具有良好的安全性。

玻璃经过着色、外形加工、表面处理或制成中空玻璃后具有特殊的装饰效果和良好的使用功能，可满足各种工程的不同要求。

(2) 铸石

铸石是以玄武岩、辉绿岩及某些工业废渣等较低熔点的矿物为原料，经配料和高温熔化后浇注成型，并经冷却结晶和退火，再经加工制成所需的产品。铸石生产中模仿了火成岩的形成过程，并经人为控制处理取得所需的性能。因此具有优异的耐磨及耐腐蚀性能，某些条件下的耐磨能力可比普通钢材高5～50倍，几乎耐各种酸或碱的腐蚀，其韧性也优于天然石材。

由于铸石的形状和性质能够在生产中控制，它不仅可生产各种板材，还可生产管材等各种异型材。铸石除可代替天然石材外，还可代替各种金属、橡胶或木材等，应用于各种土木工程、冶金、化工、电力及机械等工程。

(3) 微晶玻璃（也称水晶玻璃）

它是以石英砂、石灰石、萤石、工业废渣等为原料，在助剂的作用下高温熔融和水淬处理形成微小的玻璃结晶体，再按要求入模压实并经高温晶化处理后而成的仿石材料。它也属于玻璃-陶瓷复合材料，是玻璃相中均匀地析出大量细小的晶体后，由晶相与玻璃相共同组成的致密均匀混合体。其中的微晶体颗粒大小只有0.01微米到几微米，但可占玻璃总量的50%~90%。微晶玻璃的光折射性很强，它可以是晶莹剔透，类似无色水晶的外观，也可以是五彩斑斓的色彩。后者经切割和表面加工后，表面可呈现出大理石或花岗岩的表面花纹，具有良好的装饰性。

微晶玻璃可具有良好的物理力学性能，能够适于不同的环境，或满足不同的工程特殊要

求。通常微晶玻璃的机械强度较高，抗冻性和热稳定性很好，具有良好的耐腐蚀性和耐候性，还有较强的耐磨性和抗冲击能力。因为微晶玻璃制品是模制而成的，又可以加热变形，可制作各种形状的产品，适于制作各种异型产品代替天然石材，是很有发展前途的仿石材料。

不同晶化处理的微晶玻璃可获得不同的功能效果，可具有光敏性、热敏性、磁敏性或电敏性等。由于微晶玻璃优良的特殊性能，使其在机械、化工、航空与建筑等各种行业中具有很好的应用前景。目前在土木建筑中可作为优良的装饰材料、耐酸、耐磨材料，还是发展智能建筑材料的主要方向之一。

3. 胶结型人造石材

(1) 人造大理石

胶结型人造大理石是以胶结剂、填料及颜料为原料，经模制、固化和加工制成的人造石材。按生产人造大理石的胶结材料不同可分为以下几种。

(2) 树脂型人造大理石

它是以不饱和聚脂为胶结剂，天然碎石和石粉为填料，加入适当的颜料拌制而成的混合料，经浇捣、固化、脱模、烘干、抛光等工序制成的人工石材。这种人造石材具有耐水、耐冻、外观光洁细腻、力学强度高的优点，它的抗污染能力强，但表面耐磨性和大气稳定性较差。

为进一步改善其物理力学性能，可先以坚硬的天然级配碎石充分密实地填充于密闭容器中，将其内部抽成真空，再以液体有机树脂充填碎石间的空隙，经固化后形成石材。这种人造石材也称真空高压石，它不仅节约树脂，而且具有更高的强度、耐久性和耐磨性，可用于室内外的墙面和地面装饰，是性能优良的人工石材。

(3) 水泥型人造大理石

它是以白水泥、普通水泥或特种水泥为胶结剂，与碎大理石及颜料配制而成的混合料，经浇捣成型和养护制成的人工石材。这种人造大理石成本低，耐大气稳定性好，也具有较强的耐磨性。

(4) 复合型人造石材

它是以水泥型人造石材为基层，树脂型人造大理石为面层，将两层胶结在一起形成的人工石材，或以水泥型人造石材为基体，将其在有机单体中浸渍，再使浸入内部的单体聚合而固化形成的人工石材。复合型人造石材既有树脂型人造大理石的外在质量，又有水泥型人造大理石成本低的优点，是工程中较受欢迎的贴面人工石材。

第二节　建筑保温材料

当前的世界正面临着能源危机，能源危机在许多地区已成为制约经济发展的主要因素。因为能源是社会发展的重要物质基础，所以开发和充分利用各种能源已成为当今世界的潮流。基于开源节流的观点，各国政府都把节能工程列为石油、煤炭、天然气和水电之后的第五大常规能源。在节能工程中，最为重要的就是减少或消除热能的浪费，所应采取最有效的手段就是通过加强各种建筑物和设备的保温，充分利用热能，防止热量的散失。因此，在各种工程中保温工程和保温材料也具有十分重要的地位。

为使建筑物室内有较稳定的温度，为人们创造舒适的环境，凡是建筑物与外界接触的部位都应做保温处理。在屋面施工中必须设置保温层，在外墙体施工时必须保证墙体的保温能

力。这些都离不开保温材料。建筑工程中常用的保温材料有很多，目前工程中使用较多的有玻璃棉、矿物棉、泡沫塑料、泡沫混凝土、加气混凝土、膨胀珍珠岩及其制品、膨胀蛭石以及多孔炉渣等。

在建筑工程保温施工中常采用的保温材料有加气混凝土、膨胀岩类材料及其制品、泡沫塑料、矿物棉及其制品等。

1．膨胀珍珠岩及其制品

膨胀珍珠岩是以天然珍珠岩颗粒为原料，经加热高温后使其自身膨胀而成的多孔轻质颗粒。膨胀珍珠岩十分轻，堆积密度通常为 70～250 kg/m^3；其颗粒结构为蜂窝泡沫状，它保温性好，化学稳定性好，不燃烧、耐腐蚀、施工方便，是良好的保温、吸音与防火材料。其缺点是容易吸水，而且吸水后的保温性能明显变差，因此施工中应注意防止浸水，并做好防水封闭层的施工。

除了在屋面保温工程中使用散粒状膨胀珍珠岩外，在墙体、管道及设备的保温施工中可以使用膨胀珍珠岩制品。它是利用各种胶黏剂将散粒状的膨胀珍珠岩黏结成板、砖、管瓦等产品，它可方便地直接在工程中使用。此外，在墙体及抹面施工中，膨胀珍珠岩可以代替集料拌制保温混凝土或保温砂浆，起加强保温的作用。

2．膨胀蛭石及其制品

天然蛭石是含水的矿物，经过晾干、破碎、筛选和煅烧可以产生 5～10 倍的膨胀，从而形成蜂窝状的内部结构。膨胀蛭石的堆积密度也很低，约为 80～200 kg/m^3；因此其保温性很好，耐火性也较好；膨胀蛭石耐碱但不耐酸，电绝缘性不好，吸水性较强。在屋面施工中常使用散粒状膨胀蛭石，在施工中应注意上述特点。

在墙体、楼板与地面保温施工中常采用水泥或水玻璃黏结的各种膨胀蛭石制品，特别是膨胀蛭石轻集料混凝土墙板等轻质构件在工程中已得到较广泛的应用。

3．矿物棉及其制品

矿物棉是以无机矿物（岩石、砂、矿渣）及辅助材料为主要原料，经高温熔融为液体，再经高速离心或喷吹等工艺制成的棉丝状无机纤维。以工业废料矿渣为主要原料生产的矿物棉称为矿渣棉（简称矿棉），其纤维直径较粗，单丝长度较短，熔化温度也较低。以玄武岩或辉绿岩等天然岩石为主要原料生产的矿物棉称为岩棉。相对矿棉来说，岩棉的纤维直径较细，单丝长度也较长，熔化温度较高，化学稳定性也较好。因此，岩棉的绝热性好，加工性也好些，耐高温性更好，抵抗化学侵蚀的性能和力学性能都较好。

这些材料的特点是质量轻、耐高温、防蛀、抗腐蚀性好，具有良好的保温、吸音、防火性能。其原棉的表观密度通常为 50～200 kg/m^3，制品的表观密度约为 80 kg/m^3 左右。其表观密度越小保温性就越好，表观密度越大强度就较高，工程中常根据对保温性及强度的综合要求来选择不同密度等级的矿物棉及其制品。

为适应不同的用途与环境，可将矿物棉制成散絮状、颗粒状、毡状、板状、带状、管状或其它异形状的制品。矿物棉大量应用于建筑墙体和屋面的隔热与吸声、设备与管道的隔热或在高温下，对设备起支垫缓冲作用。

国家标准对矿物棉要求有：颗粒直径大于 0.25 mm 的渣球含量应小于 18%，表观密度应不大于 150 kg/m^3，试验密度 150 kg/m^3 下的导热系数不大于 0.044 W/（m.K），最高使用温度不低于 650 ℃，做成制品后的有机质含量应小于 4%。

就节能的角度，建筑保温的效果应尽可能好。但是考虑保温材料等成本投入，从总体经

济效果上来看应有一个最佳的保温方案，那就是保温的一次性投资与长期节能经济效果的综合成本最低。因此，选择保温材料时通常根据其保温性能选用最佳厚度。

值得注意的是，矿物棉类保温材料易于吸水，并且吸水后保温性能急剧下降。因此常在其外面进行防水处理，如外覆防水卷材或涂防水涂料，也可直接对保温材料本身进行憎水性处理，如利用有机硅溶液（或乳液）、沥青乳液、高温油、石蜡等进行处理，这些已经处理过的保温材料在使用中节能保温效果更为可靠。

矿物棉在建筑工程中主要用于现场复合保温墙体的施工，在已有建筑物墙外黏贴保温层、工厂生产复合保温墙板、屋面保温层、房门保温、管道保温等。

4．玻璃棉及其制品

玻璃棉是玻璃纤维的特例，它是利用玻璃液吹制或甩制成的絮状短粗纤维，各单丝纤维间相互缠绕、立体交叉，形成整体状态下的均匀微细多孔材料。它是一种容重很轻的保温、隔声和吸声材料。

国家标准对玻璃棉及其制品的技术指标主要要求导热系数（约为 0.044 W/（m.K））、单位容重、最高使用温度、渣球含量、纤维直径、降噪系数等。通常纤维直径越细、单位容重越小、渣球含量越小时，其保温隔声性能就越好。

玻璃棉主要应用于要求保温、隔声和吸声效果较高的天棚、隔墙、电器设备的隔声吸音。使用中应注意防止对皮肤的伤害，也应注意其脆性。

岩棉、玻璃棉和矿渣棉主要用于制作各种板材、毡、管、壳等，如装饰吸音板、防火保温板、防水卷材、管道保温毡、墙体复合保温层、屋面保温层、隔音防火门等。

5．泡沫塑料保温材料

泡沫塑料是以各种有机树脂为主要原料生产的超轻质高级保温材料，根据所采用的树脂不同，其种类繁多，工程中较常使用的主要有聚苯乙烯、聚氨酯、聚氯乙烯、聚乙烯、脲醛、环氧等泡沫塑料。

泡沫塑料保温材料的特点是质量轻（多为 20～50 kg/m^3）、绝热性好、耐低温性好、有一定的吸音效果、吸水率小、可加工性好。但是，泡沫塑料的使用温度不高，多在 70～120 ℃以下，其强度也较低。

泡沫塑料在建筑工程中主要用于填充墙体等围护结构、保温板材或管材的夹心层、水泥泡沫塑料颗粒复合板材或保温砖等。

泡沫塑料在工程中使用时应注意其特点，以在墙体保温中使用聚苯乙烯泡沫塑料板为例，在黏贴泡沫塑料板前应先将基层抹平搓毛，并且最好涂刷一道冷底子油，以增加防潮能力和黏结强度。贮存与运输中应远离火源、热源，也不能常时间曝晒，以防燃烧或老化。使用温度不得超过 120 ℃，以防熔化或松软而变形。可以利用其高温易熔的特点利用电热丝进行切割，也可用钢锯条进行切割。

6．加气混凝土

加气混凝土是以粉煤灰或磨细砂、石灰、水泥、引气剂及其它辅助材料生产的多孔材料，是纯无机多孔材料。它自重轻，表观密度一般为 300～1 000 kg/m^3；保温性好，适合于大多数情况下的各种保温施工；施工加工性能方便，可锯、可钉、可刨、易黏结。此外，加气混凝土的原料来源广泛，成本低，因此在建筑墙体与屋面保温施工中应用广泛。

加气混凝土的强度较低，通常为 2.5～7.0 MPa，5.0 MPa 以下的加气混凝土只能作为填充墙体使用，不能用作支撑楼板、大梁等重荷载。加气混凝土的抗高温能力和抵抗冻融的

能力较好，适合于室内外各种环境中使用。值得注意的是其表面装饰抹灰时容易出现空鼓、脱落或开裂等缺陷，施工中多进行专门的表面处理和加强。使用时还应注意其含水量对施工质量的影响。

建筑工程中使用的加气混凝土产品有各种砌块、墙板、屋面板等。其主要质量指标有强度、表观密度、含水率、外观状态等。它主要用于砌筑有保温性要求的墙体、墙体保温填充或黏贴，也可以用作屋面保温板或屋面保温块，还可以用作管道保温或设备保温等。

第十三章　新型建筑材料及其发展

经过数千年的开采和使用，性能良好的天然建筑材料已尚存不多，要继续大量使用那些性能优良的天然材料也不可能，因此必须另辟新的途径开发性能优良的建筑材料。另一方面，随着人们对生活水平要求的不断提高，原来的建筑材料已不能满足工程的使用要求，必须开发性能更优良的材料来满足社会对材料的要求。现代技术的不断进步，研究、开发和利用性能更优良的建筑材料已成为可能，为开发性能优良的新型建筑材料提供了技术上的保证。

第一节　有机高分子材料

有机高分子材料是由高分子化合物组成的材料，高分子化合物（也称聚合物）是由千万个原子彼此以共价键连结的大分子化合物构成的。有机高分子材料是土木建筑工程中不可缺少的一类建筑材料，特别是那些分子量上万的有机材料在土木建筑工程中的某些部位具有十分关键的作用。如塑料、橡胶、黏结剂和前面已经介绍的沥青材料等有机高分子材料，以及由它们复合的材料在土木建筑工程中的应用日益广泛。

一、有机高分子材料的特性

与其它土木建筑材料相比，有机高分子材料的工程性质具有如下特点：

1．密度小

有机高分子材料的密度较小，一般为0.8～2.2 g/cm^3，属于轻质建筑材料，这也是它在土木建筑工程中的优点之一。

2．力学性能好

常温下大部分有机高分子材料的韧性良好，其中有许多强度较高，特别是抗拉、抗弯、抗冲击和抗疲劳强度较高，有些变形能力很强，使其在工程的某些部位可取代脆性很强的无机材料。但是，有机高分子材料的力学性能受温度变化的影响很大，通常在较高温度下强度会下降，有的会表现出更高的弹性或塑性；当温度较低时，有机高分子材料的弹性和韧性会显著下降，甚至变脆。这种力学性能随温度变化的特点，使其在土木建筑工程中的应用受到限制。

3．耐水性和耐湿性好

多数有机高分子材料憎水性很强，有良好的防水和防潮性，是土木建筑工程中最常用的防水材料。工程中常通过选择材料的品种和厚度来满足不同的防水要求。

4．耐腐蚀性好

多数有机高分子材料结构十分稳定，对酸、碱、盐等介质的耐腐蚀性优于普通无机建筑材料。因此，对处于这些环境的建（构）筑物常用有机高分子材料进行保护性处理。

5．加工性好且使用方便

有机高分子材料可采用多种加工工艺，可塑制成各种形状、厚度不同的产品；有的经溶

剂稀释后可现场施工操作，能适应工程的不同需要。

6. 耐高温和大气稳定性差

多数有机高分子材料高温下易产生软化、分解或燃烧等变化，失去某些工程性质。因此其耐热及耐火性差。在阳光（特别是紫外线）、热、氧及水蒸气的作用下，有机高分子材料的组成及内部结构会不断变化而老化，使其不断变脆甚至开裂，性能逐渐恶化而失去原有的工程性质。

7. 对人和环境的健康有不良影响

多数有机高分子材料在生产、施工及使用过程中可能释放出挥发性有机物，常接触这种材料后会对人体产生不良影响，也会对环境造成不同程度的危害。因此，多数有机高分子材料不属于绿色建筑材料，在房屋建筑中的某些部位使用应予以限制。

此外，有机高分子材料的绝缘性好，抵抗生物破坏的能力强，在某些工程中是良好的代金属、代木材料。

二、建筑塑料

塑料是以有机高分子化合物为基本材料，加入各种改性添加剂后，在一定的温度和压力下塑制而成的材料。

1. 塑料的分类

根据塑料的热行为可分为热塑性塑料和热固性塑料：热塑性塑料经加热成型，冷却硬化后，再经加热还具有可塑性；热固性塑料是经初次加热成型并冷却固化后，其中多数有机高分子已发生聚合反应，形成了热稳定的高聚物，此物质即使再经加热也不会软化和产生塑性。总之，热塑性塑料的塑化和硬化过程是可逆的，而热固性塑料的塑化是不可逆的。常用的热塑性塑料有聚氯乙烯塑料（PVC）、聚乙烯塑料（PE）、聚丙烯塑料（PP）、聚苯乙烯塑料（PS）、改性聚苯乙烯塑料（ABS）、聚甲基丙烯酸塑料（PMMA 即有机玻璃）；常用的热固性塑料有酚醛树脂塑料（PF）、脲醛树脂塑料（UF）、三聚氰胺树脂塑料（MF）、环氧树脂塑料（EP）、不饱和聚酯树脂塑料（UP）和有机硅树脂塑料（SI）等。尽管这些树脂的性能不同，但是它们的基本构成形式却相似。

2. 塑料的构成

塑料是由起胶结作用的树脂和起改性作用的添加剂构成的。

（1）树脂

树脂为塑料的主要成分，其质量占塑料的 40% 以上，在塑料中起胶结作用，并决定塑料的硬化性质和工程性质。塑料常以所用的树脂命名。常用塑料的基本性质和应用可见表 13－1。

常用塑料主要性能参数、特性和应用 **表 13－1**

树脂名称	抗拉强度（MPa）	密度（g/cm³）	耐热温度（℃）	特性与用途
聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）	1.18～1.20	49.0～77.0	65～90	有较好的弹、韧性和抗冲击强度，耐低温性好，透明度高，易燃，可制有机玻璃
聚丙烯（PP）	0.90～0.91	30.0～39.0	100～120	密度最低，强度及耐热性较好，可制纤维、薄膜、管材、器具及工程配件等
聚苯乙烯（PS）	1.04～1.07	35.0～63.0	65～95	耐水、耐腐蚀和电绝缘性好，透光，易加工和着色，但性脆，可制各种板材

续表

树脂名称	抗拉强度（MPa）	密度（g/cm³）	耐热温度（℃）	特性与用途
聚氨酯发泡树脂（PU）	0.03～0.05	0.10～0.13	85	制泡沫塑料，保温，减震材料，调制涂料、胶黏剂和防水材料等
聚氯乙烯（PVC）	1.16～1.45	10.5～63.3	66～79	耐酸碱，强度较低，对光和热不大稳定，可制管、板材、门窗、地板、防水材料
聚乙烯（PE）	0.91～0.97	8.4～31.7	49～82	耐水，耐低温，耐腐蚀，稳定性、绝缘性、物理机械性好，可燃，宜作防水材料
环氧树脂（EP）	1.12～1.15	70	150～260	耐热，化学稳定，黏结性好，吸水率低，强度高，宜作玻璃钢、胶黏剂和涂料等
不饱和聚酯树脂（UP）	1.10～1.45	42.0～70.0	120	耐腐蚀，力学性和加工性较好，宜作玻璃钢、管道、仿石材料
有机硅树脂（SI）	1.65～2.00	18.0～30.0	>250	耐高、低温，耐腐蚀，稳定性好，绝缘性好，宜作高级绝缘或防水材料

（2）改性添加剂

为改善塑料的性质，需加入多种作用不同的添加剂。常用的添加剂有如下几种：

a．填充料

为调节塑料的物理化学性能，提高机械强度，扩大使用范围而加入的粉状或纤维状无机化合物。如加入玻璃纤维可提高塑料的机械强度；加入云母可增强塑料的电绝缘性；加入石棉可改善塑料的耐热性。加入填充料后还可降低塑料的成本。常用的填充料还有石灰石粉、滑石粉、铝粉、碳黑、木屑、木粉及其它纤维等。

b．增塑剂

为提高塑料加工时的可塑性，使其在较低的温度和压力下成型而加入的化学物质就是增塑剂。有些增塑剂还能改善塑料的强度、韧性、柔顺性。不同塑料对增塑剂是有选择性的，它必须能与树脂相混溶，其性能的变化也不得影响塑料的工程性质。常用的增塑剂有邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯、磷酸三甲酚酯、二苯甲酮、樟脑等。

c．固化剂

固化剂是调节塑料固化速度，使树脂硬化的物质。通过选择固化剂的种类和掺量，可取得所需要的固化速度和效果。常用的固化剂有胺类、酸酐、过氧化物等。

d．稳定剂

它是为使塑料长期保持工程性质而加入的物质。常用的稳定剂有抗老化剂、热稳定剂等，如硬脂酸盐、铅化物及环氧树脂等。

e．着色剂

塑料中加入着色剂是为获得所需的色彩。塑料中加入的着色剂应能与树脂相混熔或混溶，在加热加工和使用中应稳定。

为使塑料获得某种性能还可加入润滑剂、发泡剂、阻燃剂等。

3．塑料的应用

（1）塑料在工业与民用建筑中可生产塑料管材、板材、门窗、壁纸、地毯、器皿、绝缘

材料、装饰材料、防水及保温材料等。

(2) 在基础工程中可制作塑料排水板或隔离层、塑料土工布或加筋网等。

(3) 在其它工程中可制作管道、容器、黏结材料或防水材料等，有时也可制作结构材料。

在选择和使用塑料时应注意其耐热性、抗老化能力、强度和硬度等性能指标。

三、其它有机高分子材料及在土木工程中的应用

1. 高分子黏结剂

能够将两种材料直接黏结在一起的物质被称为黏结剂，黏结剂的种类繁多，但应用品种最多和效果最好的黏结剂还是高分子黏结剂。

常用的高分子黏结剂有热固型黏结剂、热塑型黏结剂、橡胶型黏结剂、混合型黏结剂等。组成黏结剂的成分有：

(1) 黏料

它主要起基本黏结作用，是黏结剂的主要成分，常用的黏料是各种合成树脂，如：环氧树脂、聚氨酯树脂、有机硅树脂、酚醛树脂、脲醛树脂、聚醋酸乙烯树脂、聚乙烯醇甲醛树脂等。其中以热固性树脂的黏结强度较高。

(2) 固化剂和催化剂

它们是为使黏结剂固化迅速或强度提高而加入的物质，往往将其与黏料分开放置和保存，使用前现场混合后立即使用。

(3) 填料

它是为改善黏结剂的强度、稳定性而加入的物质，加入填料后还可降低成本。

(4) 稀释剂

它是为调节黏结剂的黏度，便于使用操作而加入的有机溶剂。常用的稀释剂有环氧丙烷、丙酮、二甲苯等。

常用的建筑黏结剂有环氧树脂黏结剂、聚氨酯黏结剂、不饱和聚酯树脂黏结剂、酚醛树脂、糠醛树脂黏结剂、氯丁橡胶黏结剂、丁腈橡胶黏结剂等。

2. 橡胶制品

它是以橡胶为黏料，加入配合剂改性，并进行硫化处理制成的产品。硫化处理的目的是使橡胶大分子相交联，形成空间网络结构，使塑性的黏弹性变成高弹性固体。

为改善橡胶的性能常加入某些改性物质，如填充剂、软化剂、增塑剂、稳定剂等。

常用橡胶有丁苯橡胶、丁基橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶、硅橡胶、氟橡胶及氟硅橡胶等。在土木建筑工程中常用橡胶作为黏结剂、涂料、沥青、卷材的改性剂，还可生产橡胶止水条、橡胶伸缩缝、橡胶桥梁支座、橡胶冷胶料等。

工程中应注意橡胶的硬度、强度、耐热性、耐寒性、耐候性与耐臭氧性等是否适应使用环境和使用要求。

第二节　仿木建筑材料

木材是性能优良的建筑工程材料，但是现有的木材资源已经很少，不可能大量应用于土木建筑工程中，为取得与木材相似的效果，许多工程中已开始大量使用各种代木材料。

一、氯氧镁水泥仿木材料

氯氧镁水泥是以 MgO 为主要成分，加入其它辅助材料制成的胶凝材料。它经水化硬化

后具有良好的力学性能，适当加工后具有类似木材的性能，在工程某些方面的应用可代替木材。

1．氯氧镁水泥的组成

生产氯氧镁水泥的主要原料是菱镁矿或白云石，其主要成分为 $MgCO_3$，这些原料经过煅烧到 600～1 000 ℃时，便会分解形成轻烧菱镁粉 MgO，它是氯氧镁水泥的主要成分。当轻烧菱镁粉加水拌和后，MgO 能够与水反应形成 $Mg(OH)_2$，但这种水化反应形成的胶凝材料凝结硬化慢而且硬化后的强度很低，没有实用价值。为此，应以氯盐（如 $MgCl_2$ 或 $MgSO_4$）水溶液拌和，在氯盐的促进作用下，它们会很快反应生成氯氧镁胶体颗粒并形成凝胶，产生凝结和强度。因此虽然氯氧镁水泥中氯盐的用量不多，但它却是十分重要的组成成分。

作为建材产品供应的氯氧镁水泥（也称菱苦土或苛性菱苦土）是指轻烧菱镁粉，其主要组成成分要求见表 13－2；氯氧镁水泥的技术指标要求见表 13－3。

氯氧镁水泥的成分要求 **表 13－2**

成 分 要 求	优等品（A）	一等品（B）	合格品（C）
氧化镁，不少于	80%	75%	70%
游离氧化钙，不多于	2%	2%	2%
烧失量，不大于	8%	10%	12%

氯氧镁水泥的技术指标要求 **表 13－3**

产品等级	初凝不小于（min）	终凝不迟于（h）	细度（0.08 mm）筛余不大于	1 d 抗折不低于（MPa）	3 d 抗折不低于（MPa）	1 d 抗压不低于（MPa）	3 d 抗压不低于（MPa）
优等品（A）	40	7	15	5	7	25	30
一等品（B）	40	7	15	4	6	20	25
合格品（C）	40	7	20	3	5	15	20

注：氯氧镁水泥的安定性必须合格。

2．氯氧镁水泥的性能特点

氯氧镁水泥适于干燥环境养护，而且凝结硬化快。力学强度高，28 d 抗压强度可达到 110 MPa，抗折强度可高达 20 MPa，早期强度也很高；弹韧性好，弹性模量较低。

氯氧镁水泥碱性低且与多种纤维材料有良好的黏结性，与玻璃纤维、植物纤维等复合后可形成轻质高强的复合材料，但不能加钢筋；它防火性好，保温性较好，磕碰时不会产生火花；其制品表面致密，耐磨，耐有机溶剂，且易于加工。

氯氧镁水泥耐水性较差，软化系数为 0.4～0.6，由于含有较多的氯化镁，极易吸潮并产生严重变形，造成内部结构变化和强度降低，再次干燥后还会形成返霜，因此使用氯氧镁水泥时，应限制氯化镁的用量。为改善氯氧镁水泥的耐水性和耐潮性，可掺入外加剂防止水化物的水解；掺入憎水性改性材料，防止水分的侵入；掺加某些化学物质，改变水化反应产物，使其耐水性提高。

3．氯氧镁水泥的应用

（1）仿木菱镁混凝土

掺入锯木屑制成氯氧镁水泥混凝土，用于制作墙板、包装板、门窗、矿山坑道枕木及活动房等。它还可现场制作混凝土仿木地面，防火耐磨的地面，也可预制成装饰性地板砖。其制作方法是先将轻烧菱粉和氯化镁溶液配制成浆体，再加入木屑，充分搅拌、模注压实成型，并干燥养护后脱模即可。在氯氧镁水泥浆体中加入粉煤灰、膨胀珍珠岩、发泡塑料颗粒等还可制成各种轻质菱镁混凝土材料。这些材料都具有类似木材的性能，在土木工程中的某些方面是经济可行的代木材料。

(2) 氯氧镁水泥复合增强材料

利用玻璃短纤维或玻璃布与氯氧镁水泥复合，可形成抗折强度较高的复合材料，用于制作水泥瓦、仿琉璃瓦、仿卫生陶瓷、通风通气管道、纤维水泥板等。

(3) 苇筋氯氧镁水泥制品

以芦苇加强氯氧镁水泥制品可生产小型屋架、梁、农用菜棚骨架等。

二、仿木钙塑材料

钙塑材料是由无机材料与有机树脂按比例混合，经一定的加工工艺复合而成的复合材料。因为所用无机材料多为轻质碳酸钙、石膏等钙质材料，所用有机材料多为生产塑料的树脂，所以这种复合材料被称为钙塑材料。由于钙塑材料的性能十分接近木材，所以也是一种仿木材料。

从广义上讲，钙塑材料是一种亚微观的混凝土。与水泥混凝土类似，通过改变原材料的品种或比例可以改变钙塑材料的性能。有机树脂在钙塑材料中主要起胶结作用，它的性能(或品种)在很大程度上决定了钙塑材料的性能，常用的有机树脂有聚丙烯、聚乙烯、聚氯乙烯等热塑性树脂。钙塑材料的某些性能主要取决于树脂的种类，如热稳定性、韧性、热加工性等。

此外还加有填料和助剂，它们的掺量和性能也是影响钙塑材料性能的重要因素之一。填料在钙塑材料中主要起填充作用，并改善机械性能和物理性能，对填料技术指标的要求主要有密度、细度及热稳定性等。为改善钙塑材料的某些性能，还可加入助剂，如增韧剂、发泡剂、稳定剂、交联剂、着色剂和润滑剂等。根据加入发泡剂的多少不同，可生产低发泡钙塑材料或高发泡钙塑材料。

钙塑材料的一般生产工艺主要为：

混合→混炼→发泡→热压成型→切割加工→成品

钙塑材料的主要性能特点有：重量轻，防水防蛀，内部孔隙率高，绝热保温性好；与纯树脂相比强度较高，耐热性较好，刚度、硬度和热稳定性较好，热胀系数较小。但是不同的树脂所生产的钙塑材料又具有各自的特点，如聚氯乙烯钙塑材料具有机械性能好、耐酸碱和耐油性好、耐燃性较强、加工性好、耐水性好等优点，许多性能与木材类似，甚至有些优于木材，在土木建筑工程中也是较好的代木材料。此外还可根据工程要求加入其它填料，如木屑、轻质纤维等，其性能更接近木材。钙塑材料还是一种可多次再生的材料，有利于节约资源。

由于钙塑材料性能可变，它在土木建筑工程中具有较广泛的应用前景，如可用于制作仿木门窗、天花板、隔墙板、屋面板、楼梯或护栏扶手、装饰材料、防水材料、各种管道、卫生器具或家具等。

普通钙塑材料的防火性和抗老化性较差，工程中应注意其应用环境和耐久性要求。

三、稻(麦)草板

稻草和麦秆都是粮食作物的秸秆，是季节性的农业副产品。由于这些秸秆的产量很大，

目前大部分是被烧掉，这样既浪费资源又污染环境，开发和利用这些秸秆意义重大。

虽然稻草和麦秆为空心结构，但是秆壁的内部结构纤维细胞组织比较发达，具有类似于木材纤维的性能，适于制作仿木材料。秸秆中还含有淀粉、果胶和树脂酸等，这些物质在一定条件下会溶出形成胶凝物，使秸秆具有自身相互黏结的能力，为产生相互黏结的材料提供了条件。

稻（麦）草板主要是利用这些秸秆本身的胶结组分，在高温高压条件下使其黏合在一起的，它不用或只用很少的外加胶结材料。其主要生产工艺为：

稻（麦）草捆→松捆分选→加热加压→冷却固化并饰面→切割成产品

稻（麦）草板表观密度小，一般为 340～450 kg/m^3；导热系数小，约0.117 W/（m·K），保温隔声性能好，有较高的抗弯强度，有较强的耐燃性和良好的大气稳定性；还具有可锯、可钉、可钻等加工性。

稻（麦）草板可代替木材用于制作轻质屋面板、天花板、隔墙板、外墙板、门板、风景屏风、活动房等，经表面防水或装饰处理后可用于各种环境的装饰，是一种成本低廉的代木材料。

四、水泥刨花板

水泥刨花板是以水泥和刨花作为主要原料生产的板材，它可以制成各种代木制品，充分利用各种木材的下脚料。

生产水泥刨花板的主要原料有水泥、刨花、填料和外加剂等。应采用强度等级为 32.5 及其以上的水泥；可以采用木材加工时产生的刨花，也可用下脚料特制刨花，或以木屑、木纤维、农作物秸秆或谷物壳等填料改善水泥刨花板的内部结构；为克服木质物对水泥凝结硬化的不良影响，常加入适量能促进水泥凝结硬化的外加剂，如硫酸铝、水玻璃或三乙醇胺等。

通常在水泥刨花板的总质量中，水泥占 60%以上，刨花及轻质填料不足 40%，随着刨花和填料用量的增加，水泥刨花板的容重减轻，但抗压强度可能下降，吸水率会增大。其生产工艺如下：

按比例配料→搅拌均匀→气流铺装→成坯冷压→加热养护→产品

水泥刨花板的容重较轻，一般为 1 050～1 300 kg/m^3，抗压强度为 10～15 MPa，抗折强度为 9～12 MPa；导热系数为 0.162～0.255 W/（m·K），吸水率为 20%～35%；性能与木材相近，可进行锯、钻、钉、胶合等加工，还具有良好的大气稳定性，耐菌虫侵蚀和耐燃性。

水泥刨花板可代替木材用作承重构件、墙板、保温隔音板、天花板等，用于表面时应进行表面防水和装饰处理，以便获得更好的效果。

第三节　新型建筑材料的发展方向——绿色建材

新型建筑材料的发展为土木工程建设的不断发展奠定了物质基础，它在土木建筑工程中的作用也越来越重要。为保证工程具有优良的使用功能，避免新型材料发展造成对环境的损害，并能源源不断地为工程建设提供质量可靠的材料，在 1988 年的国际材料科学研究会上首次提出了“绿色材料”的概念；在 1992 年的里约热内卢“世界环境与发展大会”上通过的“21 世纪议程”宣言中，确立了“可持续发展”的战略方针，制定了未来工业循环再生、协调共生、持续自然的发展原则。近年来，依据上述原则，对于土木建筑工程材料的发展提

出了“绿色建材”的概念。

一、绿色建材的基本概念

从不同的角度理解，“绿色建材”可称为生态建材、环保建材或健康建材等。其基本含义是指，不用或少用自然资源（利用工业废料或工农业副产品）、采用清洁无污染的生产技术所生产的有利于环保和人体健康的材料。

绿色建材具有如下特征：

1. 生产原料以废料、废渣、废弃物为主；
2. 采用的生产技术和工艺低能耗、无污染；
3. 产品应有利于人体的健康；
4. 产品应具有高性能和多功能的特点；
5. 产品应可循环再利用，建（构）筑物拆除后不会造成二次污染。

二、绿色建材的发展概况

早在“绿色建材”这一概念正式提出之前，许多发达国家已经十分重视发展绿色建材，世界环发大会后，各发达国家制定了一系列鼓励和扶持绿色建材，限制非绿色建材生产和使用的政策法规，使这些国家的绿色建材工业发展十分迅速，用绿色建材建成的建（构）筑物也越来越多。

近几年来，我国政府在发展绿色建材方面也制定了一些鼓励政策，并对水性涂料等部分建材产品进行了环境标志认证，部分地区已开始制定相应的绿色建材标准，拉开了我国绿色建材工业的序幕。但是，与其它发展中国家一样，由于经济发展的需要和我国的国情特点，非绿色建材工业的发展也十分迅速。目前我国的水泥工业、黏土砖生产、玻璃与陶瓷的产量和发展速度也令人担忧，它们对能源与资源的消耗及对环境的污染会严重影响我国工业以后的可持续发展。因此，在我国发展绿色建材将是一项十分艰巨的任务。依靠科技进步，大力发展绿色建材是相关行业全体同仁义不容辞的责任。

三、我国的绿色建材展望

目前我国发展绿色建材的技术还不十分完善，为此国家除制定了发展绿色建材的鼓励政策外，重点是限制一些浪费资源及能源和污染环境十分严重的非绿色建材的发展。例如关闭了一大批黏土砖、小水泥、小玻璃等企业，许多企业已转产绿色建材或准绿色建材，为我国的绿色建材工业起步开始奠定基础。目前我国业已开发和正在开发的绿色建材和准绿色建材主要有如下几种：

1. 利用废渣类为原料生产的建材

此类建材主要是以粉煤灰、煤矸石、尾矿、废砂、废渣等为原料生产的砖、砌块、板材及胶凝材料等。这些产品的特点是节能利废，但其多数的性能尚未达到优良的标准，有些因加工成本过高还难与传统建材竞争。因此，必须依靠科技进步，继续研究和开发更为成熟的生产技术，使这类产品无论是在成本方面，还是在性能方面真正达到绿色建材的标准。

2. 利用化学石膏生产的建材产品

以磷石膏、氟石膏或其它工业废石膏为原料，代替天然石膏，利用先进的生产工艺和技术可生产各种土木建筑工程材料产品。这些产品具有天然石膏产品的许多优良性能，开辟了石膏建材的新来源，并且消除了化工废石膏对环境的污染，符合可持续发展的要求，只要在生产中不会对环境产生明显的污染，此类产品应属于绿色建材。

3. 以废弃的有机物生产的建材产品

以废塑料、废橡胶及废沥青等可生产多种土木建筑工程材料，如防水材料、保温材料、道路工程材料及其它室外工程的材料。这些再生材料消除了有机废物可能对环境的污染，还节约石油等资源，在资源可持续发展方面符合绿色建材的基本要求。

4．各种代木材料

上述已经介绍的大部分人造木材多以农林副产品或工业废料为原料，还可开发以其它废料为原料的代木产品。这些代木产品只要在生产和使用中不会有害于人的健康，利用高新技术使其成本和能耗降低，它将是未来绿色建材的主要发展方向。

5．以来源广泛的地方材料为原料，用高科技生产的低成本健康建材

水是自然环境中存在最普遍和廉价的材料．它在生产和使用中的挥发不会污染环境，绿色建材的生产和使用中一般都离不开水。不同地区可能有来源丰富、不同品种的地方材料，根据这些地方材料的性质和特点，利用现代科技，可生产各种性能的健康建材。如某些人造石材、水性涂料、某些复合材料等也是绿色建材的发展方向。

第十四章　常用土木工程材料试验

试验一　建筑材料的基本性质试验

通过密度，视密度，体积密度，堆积密度的测试，可计算出材料的孔隙率及空隙率，从而了解材料的构造特征，由于材料构造特征是决定材料强度，吸水率，抗渗性，抗冻性，耐腐蚀性，导热性及吸声性能的重要因素。因此，了解建筑材料的基本性质，对于掌握材料的特征和使用功能是十分必要的。

一、密度试验

材料的密度是指在绝对密实状态下，单位体积的质量。

（一）主要仪器设备

李氏瓶，筛子（孔径 0.200 mm 或 900 孔/cm^2），量筒，烘箱，干燥器，天平，温度计，漏斗，小勺等。

（二）试样制备

1．将试样研磨，用筛子筛分除去筛余物，并放到 105～110 ℃的烘箱中，烘至恒重。

2．将烘干的粉料放入干燥器中冷却至室温待用。

（三）试验方法及步骤

1．在李氏瓶中注入与试样不发生反应的液体至凸颈下部，记下刻度（V）。

2．用天平称取 60～90 g 试样，用小勺和漏斗小心地将试样徐徐送入李氏瓶中（不能大量倾到，否则会妨碍李氏瓶中空气排出或使咽喉部位堵塞），直至液面上升至 20 ml 刻度左右为止。

3．用瓶内的液体将粘附在瓶颈和瓶壁的试样洗入瓶内液体中，转动李氏瓶，使液体中气泡排出，记下液面刻度（V_1）。

4．称取未注入瓶内剩余试样的质量，计算出装入瓶中试样质量（m）。

5．将注入试样后的李氏瓶中液面读数减去未注入前的读数，得出试样的绝对体积（V_0）。

（四）结果计算及确定

按下式计算出密度 ρ（精确至 0.01 g）

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中　m——装入瓶中的质量，g；

V——装入瓶中试样的体积，cm^3。

按规定，密度实验用两个试样平行进行，以其计算结果的算术平均值作为最后结果。但两次结果之差不应大于 0.02 g/cm^3，否则重做。

二、视密度试验

视密度是指材料在自然状态下，单位体积（包括材料的绝对密实体积与内部封闭孔隙体

积）的质量。其实验方法有容量瓶法和广口瓶法，容量瓶法用来测试砂的视密度，广口瓶法用来测试石子的视密度，下面我们就以砂和石子为例分别介绍两种实验方法。

（一）砂的视密度实验（容量瓶法）

1．主要仪器设备

容量瓶（500 ml）、托盘天平、干燥器、浅盘、铝制料勺、温度计、烘箱、烧杯等。

2．试样制备

将 650 g 左右的试样在温度为 105 ± 5 ℃的烘箱中烘干至恒重，并在干燥器内冷却至室温待用。

3．试验方法及步骤

（1）称取烘干的试样 300 g（m_0）装入盛有半瓶冷开水的容量瓶中，摇转容量瓶，使试样在水中充分搅动，以排出气泡，塞紧瓶塞。静置 24 h 左右。

（2）静置后用滴管添水，使水面与瓶颈刻度线平齐再塞紧瓶塞，擦干瓶外水分，称其质量（m_1）。

（3）倒出瓶中的水和试样，将瓶内外表面洗净。再向瓶内注入与前面水温相差不超过 2 ℃的冷开水至瓶颈刻度线塞紧瓶塞，擦干瓶外水分，称取其质量（m_3）。

4．结果计算及确定

按下式计算砂的视密度（精确至 0.01 g/cm³）

$$\rho_s = \left(\frac{m_0}{m_0 + m_2 - m_1} - \alpha_t\right) \times 1\,000(\mathrm{kg/m^3})$$

式中 m_0——试样的烘干重量，g；

m_1——试样、水及容量瓶的总重，g；

m_2——水及容量瓶总重，g；

α_t——考虑称量时的水温对水相对密度影响的修正系数，见试表 1－1。

按规定，视密度应用两份试样测定两次，并以两次结果的算术平均值作为测定结果，如果两次测定结果的差值大于 0.02 g/cm³ 时，应重新取样测定。

不同水温下砂的表观密度温度修正系数　　试表 1－1

水温℃	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
α_t	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008

（二）石子视密度试验（广口瓶法）

1．主要仪器设备

广口瓶、烘箱、天平、筛子、浅盘、带盖容器、毛巾、刷子、玻璃片。

2．试样制备

将试样筛除 5 mm 以下的颗粒，用四分法缩分（此方法见试验三，混凝土用集料试验中的取样方法）至不少于 2 kg，洗刷干净后，分成两份备用。

3．方法与步骤

（1）将试样浸水饱和后，装入广口瓶中，装试样时广口瓶应倾斜放置，然后注满饮用水，用玻璃片覆盖瓶口，以上下左右摇晃的方法排除气泡。

（2）气泡排尽后，向瓶内添加饮用水，直至水面凸出到瓶口边缘，然后用玻璃片沿瓶口迅

速滑行，使其紧贴瓶口水面。擦干瓶外水分后，称取试样、水、瓶和玻璃片的总质量（m_1）。

（3）将瓶中的试样倒入浅盘中，置于105±5℃的烘箱中烘干至恒重，取出来放在带盖的干燥器中冷却至室温后称出试样的质量（m）。

（4）将瓶洗净，重新注入饮用水，用玻璃片紧贴瓶口水面，擦干瓶外水分称出质量（m_2）。

4．试验结果的计算及确定

试样的视密度 按下式计算（精确到0.01 g/cm³）

$$\rho_s' = \left(\frac{m_g}{m_0 + m_1 - m_2} - \alpha_t\right) \times 1\,000(\text{kg/m}^3)$$

式中 m_0——试样的烘干质量，g；

m_1——试样、水、瓶和玻璃的共重，g；

m_2——水、瓶和玻璃的共重，g；

α_t——考虑称量时的水温对表观密度影响的修正系数，见试表1-2。

不同水温下碎石或卵石的表观密度温度修正系数　　试表1-2

水温℃	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
α_t	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008

按规定，视密度应用两份试样测定两次，并以两次结果的算术平均值作为测定结果，如果两次测定结果的差值大于0.02 g/cm³时，应重新取样试验，对颗粒材质不均匀的试样，如两次结果之差值超过0.02 g/cm³，可取4次测定结果的算术平均值。

三、表观密度试验

表观密度是指材料在自然状态下，单位体积（包括材料孔隙和材料绝对密实体积之和）的质量。表观密度的测试分规则几何形状试样的测定与不规则几何形状的测定，其测定方法如下：

（一）规则几何形状试样的测试（如砖）

1．主要仪器设备

游标卡尺、天平、烘箱、干燥器等。

2．试样制备

将规则形状的试样放入105～110℃的烘箱内烘干至恒重，取出放入干燥器中，冷却至室温待用。

3．试验方法与步骤

（1）用游标卡尺量出试样尺寸（试件为正方体或平行六面体时以每边测量上、中、下三个数值的算术平均值为准，试件为圆柱体，按两个互相垂直的方向量其直径，各方向上、中、下量三次，以六次的平均值为准确直径），并计算出其体积（V_0）。

（2）用天平称量出试件的质量（m）。

4．试验结果计算

按下式计算出表观密度 ρ_0

$$\rho_0 = m/V_0$$

式中 m——试样的质量，g；

V_0——试样体积（包括开口孔隙、闭口孔隙体积和材料绝对密实体积）。

（二）不规则形状试样的测试（卵石等）

此类材料体积密度的测试仍采用排液法（即卵石视密度的测定方法），其不同之处在于

应对其表面涂蜡，封闭开口孔后，再用容量瓶法或广口瓶法进行测试。方法同二。

四、堆积密度试验

堆积密度是指粉状或颗粒状材料，在堆积状态下，单位体积（包括组成材料的孔隙，堆积状态下的空隙和密实体积之和）的质量。堆积密度的测试是在测试原理相同的基础上，根据测试材料的粒径不同，而采用不同的方法。下面我们就以细集料和粗集料为例介绍两种堆积密度的测试方法。

（一）细集料堆积密度试验

1．主要仪器设备

标准容器（容积为1L）、标准漏斗（如下图所示）、台秤、铝制料勺、烘箱、直尺等。

2．试样制备

用四分法缩取（见试验三，混凝土用集料试验中的取样方法）3L试样放入浅盘中，将浅盘放入温度为105±5℃的烘箱中烘至恒重，取出冷却至室温，分为大致相等的两份待用。

3．试验方法及步骤

（1）称取标准容器的质量（m_1）；

（2）取试样一份，用漏斗和铝制料勺将其徐徐装入标准容器（漏斗出料口或料勺距标准容器筒口不应超过5 cm），直至试样装满并超出标准容器筒口；

（3）用直尺将多余的试样沿筒口中心线向两个反方向刮平，称其质量（m_2）。

4．试验结果计算及确定

试样的堆积密度ρ_0'按下式计算（精确到10 g/m³）

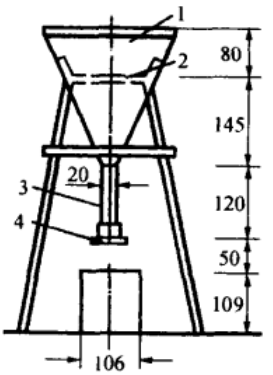
$$\rho_0' = \frac{m_2 - m_1}{V_0'}$$

式中 m_1——标准容器的质量，kg；

m_2——标准容器和试样的总质量，kg；

V_0'——标准容器的容积，L。

按规定，堆积密度应用两份试样测定两次，并以两次结果的算术平均值作为测定结果。



标准漏斗

标准漏斗

1—漏斗；2—筛子；3—20导管；4—活动门；5—容量筒

（二）粗集料堆积密度试验

1．主要仪器设备

容量筒（规格容积见试表1－3）、平头铁锹、烘箱、磅秤。

容量筒的规格要求 **试表1－3**

碎石或卵石的最大粒径（mm）	容量筒容积（L）	容量筒规格（mm）		筒壁厚度（mm）
		内径	净高	
10.0 16.0 20.0 25.0	10	208	294	2
31.5 40.0	20	294	294	3
63.0 80.0	30	360	294	4

注：测定紧密密度时，对最大颗粒为31.5、40.0 mm的集料，可采用10 L的容量筒，对最大粒径为63.0、80.0 mm的集料，可采用20 L的容量筒。

2. 试样制备

用四分法缩取（方法见试验三，混凝土用集料中取样方法）不少于表中规定数量的试样，放入浅盘，在105±5℃的烘箱中烘干，也可以摊在洁净的地面上风干，拌匀后分成大致相等的两份待用。

3. 试验方法与步骤

（1）称取容量筒 m_1，(kg)。

（2）取试样一份置于平整、干净的混凝土地面或铁板上，用平头铁铲铲起试样，使石子在距容量筒上口约5 cm处自由下落至容量筒内，容量筒装满后，除去凸出筒口表面的颗粒并以比较适合的颗粒填充凹陷空隙，应使表面凸起部分和凹陷部分的体积基本相等。

（3）称出容量筒连同试样的总质量 m_2，(kg)。

试样的堆积密度 ρ_0' 按下式计算（精确至0.01kg/m³）

$$\rho_0' = \frac{m_2 - m_1}{V_0'}$$

式中 m_1——标准容器的质量，kg；

m_2——标准容器和试样总质量，kg；

V_0'——标准容器的容积，L。

按规定，堆积密度应用两份试样测定两次，并以两次结果的算术平均值作为测定结果。

五、孔隙率、空隙率的计算

（一）孔隙率的计算

孔隙率是材料体积内，孔隙体积所占的比例。

材料的孔隙率 P 按下式计算

$$P = \frac{V_{孔}}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \times 100\%$$

式中 ρ——材料的密度，(g/cm³)

ρ_0——材料的视密度，(g/cm³)

（二）空隙率的计算

空隙率是指粉状或颗粒状材料的堆积体积中，颗粒间空隙体积所占的比例。

材料的空隙率 P' 按下式计算

$$P' = \frac{V_K}{V_0'} = \frac{V_0' - V}{V_0'} = (1 - \frac{\rho_0'}{\rho}) \times 100\%$$

式中 ρ_0——材料颗粒的视密度，g/cm³；

ρ_0'——材料的堆积密度，kg/cm³。

六、吸水率试验

材料的吸水率是指材料吸水饱和时的吸水量与干燥材料的质量或体积之比。现介绍其测试方法。

（一）主要仪器设备

天平，游标卡尺，烘箱，玻璃（或金属）盆等。

（二）试样制备

将试样置于不超过110℃的烘箱中，烘干至恒重，再放到干燥器中冷却到室温待用。

（三）试验方法及步骤

1．从干燥器中取出试件，称其质量 m（g）。

2．将试样放在金属盆或玻璃盆中，并在盆底放些垫条（如玻璃管或玻璃杆，使试样底面与盆底不致紧贴，试件之间应留 1～2 cm 的间隔，使水能够自由进入）。

3．加水至试样高度的 1/3 处，待 24 h 后再加到 2/3 处，再过 24 h 加满，以使空气排出。

4．取出试样，用拧干的湿毛巾轻轻吸去表面水分（不得来回擦拭），称其质量 m_1。

5．为检验试样是否吸水饱和，可将试样再浸入水中至高度 3/4 处，经过 24 h 重新称量，两次质量之差不得超过 1%。

（四）试验结果计算及确定

材料的吸水率 $\omega_{质}$ 或 $\omega_{体}$ 按下式计算，

$$\omega_{质} = \frac{m_1 - m}{m} \times 100\%$$

$$\omega_{体} = \frac{m_1 - m}{V_0} \times 100\%$$

式中 $\omega_{质}$——质量吸水率，%；

$\omega_{体}$——体积吸水率（用于多孔材料），%；

m——试件干燥质量，g；

m_1——试样吸水饱和质量，g。

按规定，吸水率试验应用三个试样平行进行，并以三个试样吸水率的算术平均值作为试验结果。

试验二　水　泥　试　验

一、水泥试验的一般规定

（一）取样方法

1．以同一水泥厂生产的同期出厂的同品种，同强度等级的水泥以一次进场的相同出厂编号的水泥为一批。但一批的总量不得超过 400 t。

2．散装水泥：随机抽取不少于 3 个罐车，从中各采取等量水泥，经混拌均匀后，再从中称取不少于 12 kg 水泥作为检验试样。

3．袋装水泥，随机从不少于 20 袋中各抽取等量水泥，经混拌均匀后，从中称取不少于 12 kg 水泥作为检验试样。

（二）养护条件

试体成型试验室的温度应保持在 20±2 ℃，相对湿度应不低于 50%，试体带模养护箱或养护室温度保持在 20±1 ℃范围内。试验室空气温度和相对湿度及养护池水温在工作期间每天至少记录一次。

（三）对试验材料的要求

1．当试验水泥从取样至试验要保持 24 h 以上时，应把它贮存在气密的容器里，这个容器应不与水泥起反应。

2．仲裁试验或其它重要试验用蒸馏水，其它试验可用饮用水。

3．中国 ISO 标准砂可以单级分袋包装，也可以各级预配合以 1 350±5 g 量的塑料混合

包装，但所用塑料袋材料不得影响强度试验结果。

4．水泥试样，中国 ISO 标准砂，拌和水及试模等温度均与试验室温度相同。

二、水泥细度检验

（一）目的

水泥细度测定的目的，通过控制细度来保证水泥的活性，从而控制水泥质量。

（二）检验方法

细度可用透气式比表面仪或筛析法测定，这里主要介绍筛析法中的负压筛法、水筛法和手工干筛法。

1．负压筛法

（1）主要仪器设备：负压筛、筛座、天平等。

（2）试验方法步骤

①筛析试验前，应把负压筛放在筛座上，盖上筛盖，接通电源，检查控制系统。调节负压至 4 000～6 000 Pa 范围内，喷气嘴上口平面应与筛网之间保持 2～8 mm 的距离。

②称取试样 35 g，置于洁净的负压筛中。盖上筛盖，放在筛座上，开动筛析仪连续筛动 2 min，在此期间如有试样附着在筛盖上，可轻轻地敲击，使试样落下，筛毕，用天平称量筛余物。

当工作负压小于 4 000 Pa 时，应清理吸尘器内水泥，使负压恢复正常。

2．水筛法

（1）主要仪器设备：筛子、筛座、喷头、天平、烘箱等。

（2）试验方法步骤：

①筛析试验前应检查水中无泥、砂，调整好水压及水筛架位置，使其能正常运转，喷头底面和筛网之间距离为 35～75 mm。

②称取水泥试样 50 g，置于洁净的水筛中，立即用洁净水冲洗至大部分细粉通过，再将筛子置于筛座上，用水压 0.05±0.02 的喷头连续冲洗 3 min。

③筛毕取下，将筛余物冲至一边，用少量水把筛余物全部移至蒸发皿（或烘样盘）中，等水泥颗粒全部沉淀后将水倾出，烘干后称量其筛余物。

3．手工干筛法

（1）主要仪器设备：筛子（筛框有效直径为 150 mm，高 50 mm，方孔边长为 0.08 mm 的铜布筛）、天平等。

（2）试验方法步骤：

取烘干试样 50 g 倒入筛内，用一手将筛往复摇动，另一手轻轻拍打，其速度约为 120 次/min，期间每 40 次向同一方向转动 60°，使试样均匀分布在筛网上，直至每钟通过量不超过 0.05 g 时为止，称取筛余物质量。

（三）试验结果计算

水泥试样筛余百分数按下式计算（精确到至 0.1%）

$$F = R_s / W \times 100$$

式中 F——水泥试样的筛余百分数，%；

R_s——水泥筛余物的质量，g；

W——水泥试样的质量，g。

当负压筛法与水筛法或手工筛法测定的结果发生争议时，以负压筛法为准。

三、水泥标准稠度用水量试验

（一）目的

标准稠度用水量是指水泥净浆以标准方法测试而达到一定的浆体可塑性所需加的用水量，而水泥的凝结时间和安定性都和用水量有关，此测试可消除试验条件的差异，有利于比较，同时为进行凝结时间和安定性试验作好准备。

（二）主要仪器设备

标准稠度与凝结时间测定仪维卡仪、装净浆用圆锥模或锥模、净浆搅拌机等。

（三）试验方法与步骤

标准稠度用水量可用试杆法（标准法）和试锥法（替代法）中任一方法测定，如二者结果发生矛盾时以试杆法为准。

1．试杆法

（1）试验前准备

①维卡仪的金属棒能自由滑动；

②调整至试杆接触玻璃板时指针对准零点；

③搅拌机运行正常。

（2）试验方法及步骤

用水泥净浆搅拌机搅拌，搅拌锅和搅拌叶片先用湿布擦过，将拌和水倒入搅拌锅内，然后在5～10 s内小心将称好的500 g水泥加入水中，防止水和水泥溅出。拌和时，先将锅放在搅拌机的锅座上，升至搅拌位置，启动搅拌机，低速搅拌120 s，停15 s，同时将叶片和锅壁上的水泥浆刮入锅中间，接着高速搅拌120 s，停机。

拌和结束后，立即将拌制好的水泥净浆装入已置于玻璃板上的试模中，用小刀插捣，轻轻振动数次，刮去多余的净浆；抹平后迅速将试模和底板移到维卡仪上，并将其中心定在试杆下降低试杆直至与水泥净浆表面接触，拧紧螺丝1～2 s后，突然放松，使试杆垂直自由地沉入水泥净浆中。在试杆停止沉入或释放试杆30 s时，记录试杆距底板之间的距离，升起试杆后，立即擦净；整个操作应在搅拌后1.5 min内完成。以试杆沉入净浆并距底板6±1 mm的水泥净浆为标准稠度净浆。其拌和水量为该水泥的标准稠度用水量（p），按水泥质量的百分比计。

2．试锥法

（1）试验前准备

①试验前必须检查维卡仪的金属棒能否自由滑动，试锥降至锥模顶面位置时，指针应对准标尺的零点，搅拌机运转正常。

②水泥净浆搅拌机的筒壁及叶片先用湿布擦抹干净。

（2）试验方法及步骤

①将称好的500 g水泥试样，倒入搅拌锅内。

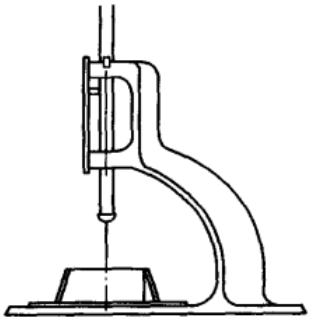
②拌和用水量的确定。

采用调整用水量方法时，按经验确定。

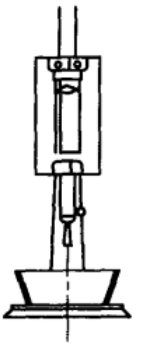
采用固定用水量方法时用水量为142.5 ml，水量精确至±0.5 ml。

（3）将搅拌锅放到搅拌机锅座上，升至搅拌位置，开动机器，同时徐徐加入拌和水，慢速搅拌120 s，停拌15 s，接着快速搅拌120 s后停机。

（4）拌和完毕，立即将净浆一次装入锥模中，用小刀插捣并振动数次，刮去多余净浆，



a.初凝时间测定用立式试模的侧视图



b.终凝时间测定用反转试模的前视图



c.标准稠度试杆



b.初凝用试针



e.终凝用试针

抹平后迅速将其放到试锥下面的固定位置上。将试锥降至净浆表面拧紧螺丝，然后突然放松，让试锥自由沉入净浆中，当试锥停止下沉时，记录试锥下沉深度，整个操作过程应在搅拌后 1.5 min 内完成。

(5) 试验结果确定

调整用水量方法时结果的确定。是以试锥下沉深度为 28±2 mm 时的净浆为标准稠度净浆，此拌和用水量即为水泥的标准稠度用水量（按水泥质量的百分比计）。如超出此范围，须另称试样，调整水量，重做试验，直到达到 28±2 mm 时为止。

固定用水量方法时结果的确定。根据测得的试锥下沉深度 S（mm），按下面的经验公式计算标准稠度用水量 P（%）

$$P = 33.4 - 0.185\,S$$

注：当试锥下沉深度小于 13 mm 时，应用调整用水量方法测定。

四、水泥净浆凝结时间试验

(一) 目的

测定水泥加水至开始失去可塑性（初凝）和完全失去可塑性（终凝）所用的时间，可以评定水泥的技术性质。初凝时间可以保证混凝土施工过程（即搅拌、运输、浇筑、振捣）的完成。终凝时间可以控制水泥的硬化及强度增长速度，以利于下一道施工工序的进行。

(二) 主要仪器设备

凝结时间测定仪维卡仪、试针和圆模、净浆搅拌机、养护箱等。

(三) 试验前准备

将圆模放在玻璃板上，在模内侧稍涂一层机油，并调整凝结时间测定仪的试针，使之接触玻璃板时，指针对准标尺的零点。

（四）试验方法及步骤

1．称取水泥试样 400 g，用标准稠度用水量拌制成水泥净浆，立即装入圆模，振动数次后，刮平，然后放入养护箱内，记录开始加水的时间作为凝结时间的起始时间。

2．凝结时间测定。在湿气养护箱中养护至加水后 30 min 时进行第一次测定。测定时，从湿汽养护箱内取出圆模，放到试针下，使试针与净浆面接触，拧紧螺丝，1～2 s 后突然放松，试针自由垂直地沉入净浆，观察试针停止下沉或释放试针 30s 时指针的读数。当试针沉至距底板 4±1 mm 时，为水泥达到初凝状态；由水泥全部加入水中至初凝状态的时间为水泥的初凝时间，用 min 来表示（如图 a)。

终凝时间的测定。为了准确观测试针沉入的状况，在终凝针上安装一个环形附件（见图)。在完成初凝时间测定后，立即将试模连同浆体以平移的方式从玻璃板上取下，翻转 180°，直径大端向上，小端向下放在玻璃板上，再放入湿气养护箱中继续养护，临近终凝时间时每隔 15 min 测定一次，当试针沉入试体 0.5 mm 时，即环形附件开始不能在试体上留下痕迹时，为水泥达到终凝状态，由水泥全部加入水中至终凝状态的时间为水泥的终凝时间，用 min 来表示（如图 b)。

测定时应注意，在最初测定的操作时应轻轻扶持金属柱，使其徐徐下降，以防试针撞弯，但结果以自由下落为准；在整个测试过程中试针沉入的位置至少要距试模内壁 10 mm。临近初凝时，每隔 5 min 测定一次，到达初凝或终凝时应立即重复测一次，当两次结论相同时才能定为到达初凝或终凝状态。每次测定不能让试针落入原针孔，每次测试完毕须将试针擦净并将试模放回湿气养护箱内，整个测试过程要防止试模受振。

（五）试验结果的确定及检定

初凝时间是指自水泥加水时起，至试针沉入净浆中距离底板 3～5 mm 时，所需的时间即为初凝时间。

终凝时间是指自水泥加水时起，至试针沉入净浆中不超过 1～0.5 mm 时，所需的时间称为终凝时间。

到达初凝或终凝时，应立即重复测一次，当两次结论相同时，才为达到初凝或终凝状态。

验定方法为将测定的初凝和终凝时间，对照国家规范中各种水泥的技术要求，从而判定凝结时间是否合格。

五、安定性试验

安定性试验可采用试饼法或雷氏夹法，当试验结果有争议时以雷氏夹法为准。

（一）目的

安定性是水泥硬化过程中体积变化的均匀性，体积的不均匀变化会引起膨胀，裂缝或翘曲等现象。

（二）主要仪器设备

沸煮箱、雷氏夹、雷氏夹膨胀值测量仪、水泥净浆搅拌机、玻璃等。

（三）试验方法及步骤

1．称取水泥试样 400 g，用标准稠度用水量，按标准稠度测定时拌和净浆的方法制成水泥净浆，然后制作试件。

（1）饼法制作：从制成的水泥净浆中取试样约 150 g，分成两等份，制成球形，放在涂过油的玻璃板上，轻轻振动玻璃板，并用湿布擦过的小刀，由边缘向饼的中央抹动，制成直径为 70～80 mm，中心厚约 10 mm，边缘渐薄，表面光滑的试饼，接着将试饼放入养护箱

内，自成型时起，养护 24±2 h。

（2）雷氏夹法制作：将预先准备好的雷氏夹，放在已擦过油的玻璃板上，并将已制好的标准稠度净浆装入试模，装模时一只手轻轻扶模，另一只手用宽约 10 mm 的小刀插捣 15 次左右，然后抹平，盖上稍涂油的玻璃板，接着将试模移到养护箱内养护 24±2 h。

2. 调整好沸煮箱的水位，使之能在整个沸煮过程中都没过试件，不需中途补充试验用水，同时又能保持 30±15 min 内升至沸腾。

3. 脱去玻璃板，取下试件。

（1）当采用饼法时，先检查试饼是否完整，在试饼无缺陷的情况下，将取下之试饼置于沸煮箱内水中的篦板上，然后在 30±5 min 内加热至沸，并恒沸 3 h±5 min。

（2）当采用雷氏夹法时，先测量试件指针尖端间的距离（A），精确到 0.5 mm，接着将试件放入水中篦板上，指针朝上，试件之间互不交叉，然后在 30±5 min 加热至沸，并恒沸 3 h±5 min。

（3）煮毕，将水放出，待箱内温度冷却至室温时，取出检查。

（四）结果鉴定

饼法鉴定：目测试饼，若未发现裂缝，再用直尺检查也没有弯曲时，则水泥安定性合格，反之为不合格。当两个试饼有矛盾时，为安定性不合格。

雷氏夹鉴定：测量试件指针尖端间的距离（C），精确至小数点后一位。当两个试件煮后增加距离（C－A）的平均值不大于 5.00 mm 时，即安定性合格，反之为不合格。当两个试件的（C－A）值相差超过 4 mm 时，应用同一样品立即重做一次试验。

六、水泥胶砂强度检验

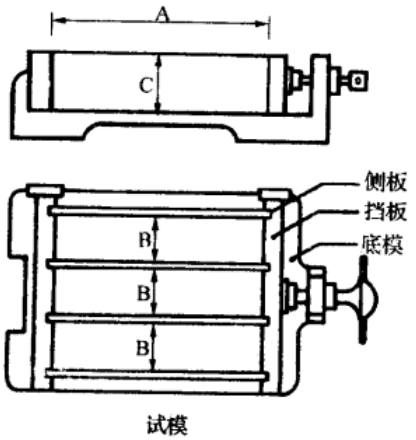
（一）目的和适用范围

根据 GB/T 17671—1999 标准要求，用软练胶砂法测定水泥各标准龄期的强度，从而确定或检验水泥的强度等级。

本标准适用于硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥以及石灰石硅酸盐水泥的抗折与抗压强度的检验。其它水泥采用本标准时必须探讨该标准规定的适用性。

（二）主要仪器设备

行星式水泥胶砂搅拌机、水泥胶砂试件成型振实台、40 mm ×40 mm 水泥抗压夹具、水泥胶砂试模（如下图）、抗折试验机、播料器及刮平直尺。



试模

（三）胶砂的制备

1. 水泥与 ISO 标准砂的质量比为 1∶3.0，水灰比为 0.50。

2. 一锅胶砂成型试体材料需要量：水泥 540±2 g，ISO 标准砂 1 350±2 g，水 225±1 g。

（四）胶砂搅拌

1. 先将水加入锅里，再加入水泥，把锅放在固定架上，上升至固定位置。立即开动机器，低速搅拌 30 s 后，在第二个 30 s 开始的同时均匀地将砂子加入。

2．当各级砂是分装时，从最粗粒级开始，依次将所需的每级砂量加完，把机器转至高速再拌 30 s。

3．停拌 90 s，在第 1 个 15 s 内用一胶皮刮具将叶片和锅壁上的胶砂，刮入中间。在高速下继续搅拌 60 s。各个搅拌阶段时间误差在 ±1 s 以内。

（五）试件的制备

1．用振实台成型

胶砂制备后立即进行成型。将空试模和模套固定在振实台上，用一个适当勺子直接从搅拌锅里将胶砂分二层装入试模，装第一层时，每个槽里约放 300 g 胶砂，用大播料器播平，接着振实 60 下。再装入第二层胶砂，用小播料器播平，再振实 60 下。移走模套，从振实台上取下试模，用一金属直尺以近似 90°的角度架在试模顶的一端，然后沿试模长度方向以横向锯割动作慢慢向另一端移动，一次将超过试模部分的胶砂刮去，并用同一直尺以近乎水平的情况下将试体表面抹平。

在试模上作标记或加字条标明试件编号和试件相对于振实台的位置。

2．用振动台成型

当使用代用的振动台成型时，操作如下：

在搅拌胶砂的同时将试模和下料漏斗卡紧在振动台的中心。将搅拌好的全部胶砂均匀地装入下料漏斗中，开动振动台，胶砂通过漏斗流入试模。振动 120 ± 5 s 停车。振动完毕取下试模，用刮平尺刮去高出试模的胶砂并抹平。接着在试模上作标记或用字条标明试件编号。

（六）试件的养护

1．脱模前的处理和养护

去掉留在模子四周的胶砂。立即将做好标记的试模放入雾室或湿箱的水平架子上养护，湿空气应能与试模各边接触。养护时不应将试模放在其它试模上。一直养护到规定的脱模时间取出脱模。脱模前，用防水墨汁或颜料笔对试体进行编号和做其它标记。二个龄期以上的试件，在编号时应将同一试模中的三条试体分在二个以上龄期内。

2．脱模

脱模应非常小心。对于 24 h 龄期的，应在成型试验前 20 min 内脱模。对于 24 h 以上龄期的，应在成型后 20～24 h 之间脱模。已确定作为 24 h 龄期试验（或其它不下水直接做试验）的已脱模试体，应用湿布覆盖至做试验时为止。

3．水中养护

将做好标记的试件立即水平或竖直放在 20 ± 1 ℃ 水中养护，水平放置时刮平面应朝上。试件放在不易腐烂的蓖子上，并彼此间保持一定间距，以让水与试件的六个面接触。养护期间试件之间间隔或试体上表面的水深不得小于 5 mm。

（七）抗折强度测定

1．抗折强度测定

将试体一个侧面放在试验机支撑圆柱上，试体长轴垂直于支撑圆柱，通过加荷圆柱以 50 ± 10 N/S 的速率均匀地将荷载垂直地加在棱柱体相对侧面上，直至折断。

保持两个半截柱体处于潮湿状态直至抗压试验。

抗折强度 R_f 以牛顿每平方毫米（MPa）表示，按下式进行计算。（精确至0.1 MPa）

$$R_f = (1.5\,F_f L)/b^3$$

其中 F_f——折断时施加于棱柱体中部的荷载，牛顿（N）；

L——支撑圆柱之间的距离，mm；

b——棱柱体正方形截面的边长，mm。

2. 抗压强度测定

半截棱柱体中心与压力机压板受压中心差应在 ±0.5 mm 内，棱柱体露在压板外的部分约有 10 mm。

在整个加荷过程中以 2 400 ± 200 N/S 的速率均匀地加荷直至破坏。

抗压强度 R_c 以牛顿每平方毫米（MPa）为单位，按下式进行计算（精确至 0.1 MPa）。

$$R_c = F_c/A$$

其中 F_c——破坏时的最大荷载，牛顿（N）；

A——受压部分面积，mm^2（40 mm × 40 mm = 1 600 mm^2）。

（八）试验结果的确定

1. 抗折强度

以一组三个棱柱体抗折结果的平均值作为试验结果。当三个强度值中有一个超出平均值 ±10%，剔除后再取平均值作为抗折强度试验结果。

2. 抗压强度

以一组三个棱柱体上得到的六个抗压强度测定值的算术平均值为试验结果。

如六个测定值中有一个超出六个平均值的 ±10%，就应剔除这个结果，而以剩下五个的平均数为结果。如果这五个测定值中再有超过它们平均数 ±10%，则此组结果作废。

试验三　混凝土用集料试验

一、取样方法

（一）细集料的取样方法

1. 分批方法：细集料取样应按批取样，在料堆上取样一般以 400 m^3 或 600 t 为一批。

2. 抽取试样：在料堆上取样时，应在料堆均匀分布的八个不同部位，各取大致相等的式样一份，取样时先将取样部位的表层除去，于较深处铲取，由各部位大致相等的八份试样，组成一组试样。

3. 取样数量：每组试样的取样数量，对于每一单项试验应不少于试表 3-1 所规定的取样重量。如确能保证试样经一项试验后不致影响另一项试验结果，可用一组试样进行几项不同的试验。

4. 试样缩分：将取回试验室的试样倒于平整、洁净的拌板上，在自然状态下拌和均匀，然后用四分法缩取各项试验所需的试样数量。四分法缩取的步骤是：将拌匀试样摊成厚度约为 2 cm 的圆饼，于饼上划十字线，将其分成大致相等的四份，除去其中对角的两份，将其余两份照上述四分法缩取，如此继续进行，直到缩分后的试样质量略多于该项试验所需数量为止。另外，还可用分料器进行缩分。

每一组试验项目所需砂的最少取样数量　　试表 3-1

试验项目	最少取样重量（g）	试验项目	最少取样重量（g）
筛分析	4 400	云母含量	600
表观密度	2 600	轻物质含量	3 200

续表

试验项目	最少取样重量（g）	试验项目	最少取样重量（g）
吸水率	4 000	坚固性	分成 5～2.5、2.5～1.25、1.25～0.63、0.63～0.315 mm 四个粒级，各需 100 g
紧密密度和堆积密度	5 000		
含水量	1 000	硫化物及硫酸盐含量	50
含泥量	4 400		
泥块含量	1 000	氯离子含量	2 000
有机质含量	2 000	碱活性	7 500

（二）粗集料取样法

1．分批方法：粗集料取样应按批进行，一般以 400 m^3 为一批。

2．抽取试样：取样应自料堆的顶、中、底三个不同高度处，在均匀分布的五个不同部位，取大致相等的试样一份，共取 15 份，组成一组试样，取样时先将取样部位的表面铲除，于较深处铲取。

3．取样数量：每组试样的取样数量，对每一组单项试验应不少于试表 3－2 规定的最少取样数量。须做几项试验时，如确无影响，可用一组试样。

每一组试验项目所需碎石或卵石的最小取样数量（kg）　　试表 3－2

试验项目	最大粒径（mm）							
	10	16	20	25	31.5	40	63	80
筛分析	10	15	20	20	30	40	60	80
表观密度	8	8	8	8	12	16	24	24
含水率	2	2	2	2	3	3	4	6
吸水率	8	8	16	16	16	24	24	32
堆积密度、紧密密度	40	40	40	40	80	80	120	120
含泥量	8	8	24	24	40	40	80	80
针片状、含泥量	1.2	4	8	8	20	40	–	–
硫化物、硫酸盐	1.0							

注：有机物含量、坚固性、压碎指标值及碱-集料反应检验，应按试验要求的粒级及数量取样

4．试样的缩分：将试样倒在平整、洁净的混凝土地面（或拌板）上，拌和均匀，堆成锥体，用前述四分法分别缩取各试验所需的试样数量。

5．若检验不合格应重新取样，对不合格项应进行加倍复检，若仍有一个试样不能满足标准要求，应按不合格处理。

二、砂的筛分析试验

（一）目的

测定试验用砂的颗粒级配，计算细度模数，评定砂的粗细程度。

（二）主要仪器设备

标准筛（孔径为 10、5、2.5 mm 的圆孔筛和 1.25、0.63 和 0.16 mm 的方孔筛）、天平、

烘箱、浅盘、毛刷、容器等。

（三）试样制品

将四分法缩取的 5 kg 试样，先筛除大于 10 mm 的颗粒，并记录其含量。如砂表面质量不合格，应先清洗，然后拌均，用四分法缩取不少于 550 g 试样两份，将两份试样分别置于 105±5 ℃的烘箱中烘至恒重，冷却至室温待用。

（四）试验方法及步骤

1. 准确称取试样 500 g。

2. 将标准筛按孔径由大到小顺序叠放，加底盘后，将试样倒入最上层 5 mm 筛内，加盖后，置于摇筛机上，摇筛约 10 min（也可用手筛）。

3. 将整套筛自摇筛机上取下，按孔径大小，逐个用手于洁净的盘上进行筛分，各号筛上均需筛至每分钟通过量不超过试样总重的 0.1% 为止，通过的颗粒并入下一号筛内并和下一号筛中的试样一起过筛。

4. 当全部筛分完毕时，试样在各号筛上的筛余量均不得超过下式的量

$$m_r = \frac{A\sqrt{d}}{200}$$

式中 m_r——在一个筛上的剩余量，g。

d——筛孔尺寸，mm。

A——筛的面积，mm^2。

否则应将筛余试样分成两份，再次进行筛分，并以其筛余量之和作为筛余量。

5. 称量各号筛的筛余试样质量（精确至 0.1 g）。分计筛余量和底盘中剩余重量的总和与筛分前的试样重量之比，其差值不得超过 1%。

（五）试验结果计算

1. 分计筛余百分数——各号筛的筛余量除以试样总量的百分率（精确到 0.1%）。

2. 累计筛余百分数——该号筛上的分计筛余百分率与大于该号各筛的分计筛余百分率之和（精确到 1%）。

（六）试验结果鉴定

1. 级配的鉴定：用各筛号的累计筛余百分率绘制级配曲线，或对照国家规范规定的级配区范围，判定其是否都处于一个级配区内。

注：除 5.00 mm 和 0.63 mm 筛孔外，其它各筛的累计筛百分率允许略有超出，但超出总量不应大于 5%。

2. 粗细程度鉴定：砂的粗细程度用细度模数 m_x 的大小来判定。

细度模数 m_x 按下式计算，精确到 0.1。

$$m_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1}$$

式中，A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6 分别为 5.0、2.5、1.25、0.63、0.315、0.16 mm 筛上的累计筛余百分率。根据细度模数的大小来确定砂的粗细程度。

当 m_x=3.7～3.1 时为粗砂

m_x=3.0～2.3 时为中砂

m_x=2.2～1.6 时为细砂

m_x = 1.5～0.7 时为特细砂

(3) 筛分试验应采取两个试样进行，取两次结果的算术平均值作为测定结果，两次所得的细度模数之差大于 0.2 时，应重新进行试验。

三、碎石或卵石的筛分析试验

(一) 目的

测定粗集料的颗粒级配及粒级规格，对于节约水泥和提高混凝土强度是有利的，同时为使用集料和混凝土配合比设计提供依据。

(二) 主要仪器设备

方孔筛（孔径规格有 2.36、4.25、9.5、16.0、19.0、26.5、31.5、37.5、53.0、63.0、75.0、90.0 mm）、托盘天平、台秤、烘箱、容器、浅盘等。

(三) 试样制备

从取回的试样中用四分法缩取不少于表规定的试样数量，经烘干或风干后备用（所余试验做视密度、堆积密度试验）。

筛分析所需试样的最小重量 试表 3-3

最大公称粒径（mm）	9.5	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	63.0	75.0
试样重量不少于（kg）	2.0	3.2	4.0	5.0	6.3	8.0	12.6	16.0

(四) 试样方法与步骤

1. 按试表 3-3 规定称取烘干或风干试样质量 G。

2. 按试样的粒径选用一套筛，按孔径由大到小顺序置于干净、平整的地面或铁盘上，然后将试样倒入上层筛中，用手摇动 5 min。

3. 按孔径由大到小顺序取下各筛，分别于洁净的铁盘上摇筛，直至每分钟通过量不超过试样总量的 0.1% 为止，通过的颗粒并入下一筛中，但应注意，当筛分完毕时，每个筛上筛余层的厚度应不大于筛上最大颗粒的尺寸，如超过此尺寸，应将该筛余试样分成两份，分别进行筛分，并以其筛余量之和作为该筛号的筛余量。当试样粒径大于 20 mm 时，筛分允许用手拨动试样颗粒，使其通过筛孔。

4. 称取各筛上的筛余量，精确至试样总重量的 0.1%。在筛上的所有分计筛余量和筛底剩余的总和与筛分前测定的试样总量相比，其相差不得超过 1%。

5. 试验结果的计算及鉴定

(1) 分计筛余百分率——各号筛上筛余量除以试样总质量的百分率（精确至 0.1%）。

(2) 累计筛余百分率——该号筛上分计筛余百分率与大于该号筛的各号筛上的分计筛余百分率之总和（精确至 1%）。

粗集料的各筛号上的累计筛余百分率应满足国家规范规定的粗集料颗粒级配范围要求。

试验四　普通混凝土立方体抗压强度试验

(一) 目的

学会混凝土抗压强度试件的制作及测试方法，用以检验混凝土强度，确定、校核混凝土配合比，并为控制混凝土施工质量提供依据。

（二）一般技术规定

1．本试验采用立方体试件，以同一龄期至少三个同时制作、同样养护的混凝土试件为一组。

2．每一组试件所用的拌和物应从同盘或同一车运送的混凝土拌和物中取样，或试验室用人工或机械单独制作。

3．检验工程和构件质量的混凝土试件成型方法应尽可能与实际施工采用的方法相同。

4．试件尺寸按粗集料的最大粒径来确定，见试表 4－1。

试表 4－1

试件尺寸（mm）	集料最大粒径（mm）	每层插捣次数（次）	抗压强度换算系数
100×100×100	30	12	0.95
150×150×150	40	25	1
200×200×200	60	50	1.05

（三）主要仪器设备

压力试验机、上下承压板、振动台、试模、捣棒、小铁铲、钢尺等。

（四）试件制作

1．在制作试件前，首先要检查试模、拧紧螺栓，并清刷干净，同时在其内壁涂上一薄层脱模剂。

2．试件的成型方法应根据混凝土的坍落度来确定。

（1）坍落度不大于 70 mm 的混凝土拌和物宜采用振动台成型。

其方法为将拌好的混凝土拌和物一次装入试模，装料时应用抹刀沿试模内壁略加插捣并使混凝土拌和物稍有富裕，然后将试模放到振动台上，用固定装置固定，开动振动台并计时，当拌和物表面呈现水泥浆时，停止振动并记录振动时间，用抹刀沿试模边缘刮去多余拌和物，并抹平。

（2）坍落度大于 70 mm 的混凝土拌和物采用人工捣实成型。

其方法为将混凝土拌和物分二层装入试模，每层装料厚度大致相同。插捣时用垂直的捣棒按螺旋方向由边缘向中心进行，插捣底层时捣棒应达到试模底面，插捣上层时，捣捧应贯穿下层深度 2～3 cm，并用抹刀沿试模边插入数次，以防止麻面。每层插捣次数，随试件尺寸而定：100 mm×100 mm×100 mm 试件插捣 12 次，150 mm×150 mm×150mm 试件插捣 25 次，200 mm×200 mm×200mm 试件插捣 50 次。捣实后，刮除多余混凝土，并用抹刀抹平。

（五）试件养护

1．采用标准养护的试件成型后应覆盖表面，防止水分蒸发，并在 20±5 ℃的室内 静置 1 d（但不得超过 2 d），然后编号拆模。

2．拆模后的试件应立即放入标准养护室（温度为 20±3 ℃，相对湿度为 90%以上）养护，在标准养护室中试件放在架上，彼此相隔 10～20 mm，并应避免用水直接冲淋试件。

3．与构件同条件养护的试件成型后，应覆盖表面，试件拆模时间可与实际构件的拆模时间相同。拆模后，试件仍需保持同条件养护。

（六）抗压强度测定

1．试件从养护地点取出，随即擦干并量出其尺寸（精确到 1 mm），并以此计算试件的

受压面积 A（mm^2）。

2. 将试件安放在压力试验机的下压板上，试件的承压面应与成型时的顶面垂直。试件的轴心应与压力机下压板中心对准。开动试验机，当压板与试件接近时，调整球座，使接触均衡。

3. 加压时，应连续而均匀地加荷。

当混凝土强度等级低于 C30 时，加荷速度取每秒钟 0.3～0.5 MPa。

当混凝土强度等级等于或大于 C30 时，加荷速度取每秒种 0.5～0.8 MPa。

当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门，直至试件破坏，然后记录破坏荷载 F（N）。

（七）试验结果计算

1. 试件的抗压强度 f_{cu} 按下式计算

$$f_{cu} = F/A$$

式中 F——试件破坏荷载，N；

A——试件受压面积，mm^2。

2. 以三个试件抗压强度的算术平均值作为该组试件的抗压强度值，精确至 0.1 MPa。

如果三个测定值中的最大或最小值中有一个与中间值的差值超过中间值的 15%，则把最大及最小值舍去，取中间值作为该组试件抗压强度值。

如果最大、最小值均与中间值相差 15%，则此组试件作废。

3. 混凝土抗压强度是以 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件作为抗压强度的标准试件，其它尺寸试件的测定结果均应换算成 150 mm 立方体试件的标准抗压强度值，换算系数见试表 4－1。

试验五　烧结空心砖与多孔砖试验

一、烧结空心砖试验

（一）取样方法

1. 外观质量检验的试样采用随机抽样法，在每一检验批的产品垛中抽取，抽样前预先确定好抽样方案。

2. 其它检验项目的样品用随机抽样法从外观质量检验后的样品中抽取。

3. 抽样数量按试表 5－1 进行。

抽样数量　　**试表 5－1**

序　号	检验项目	抽样数量（块）
1	外观质量	50（$n_1 = n_2 = 50$）
2	尺寸偏差	20
3	强度等级	10
4	泛霜	5
5	石灰爆裂	5
6	吸水率与饱和系数	5
7	冻融	5

（二）烧结空心砖抗压强度试验

1. 目的

学会烧结空心砖抗压强度试验方法，并通过测试的抗压强度，确定砖的标号。

2. 主要仪器设备

压力试验机（其示值相对误差不大于±1%，其下加压板应为球铰支座，预期最大破坏荷载在量程的20%～80%之间），水平尺（规格为250～300 mm），钢直尺（分度值为1 mm）等。

3. 试件制备与养护

试件制作采用坐浆法操作，每组10块空心砖，其中5块大面受压，5块条面受压。

（1）将玻璃板置于试件制备台上，其上铺一张湿的垫纸，纸上铺一层厚度不超过5 mm的32.5级普通硅酸盐水泥制成稠度适宜的水泥净浆，

（2）将在水中浸泡10～20 min的试样平稳地将受压面坐放在水泥浆上，在另一受压面上稍加压力，使整个水泥层与砖受压面相互黏结，砖的侧面应垂直于玻璃板。

（3）待水泥浆适当凝固后，连同玻璃板翻放在另一铺纸放浆的玻璃板上，再进行坐浆，用水平尺校正好玻璃板的水平。

（4）制成的抹面试件应置于不低于10 ℃的不通风的室内养护3 d，再进行抗压强度试验。

4. 试验方法及步骤

（1）测量每个试件连接面或受压面的长、宽尺寸各两个，分别取其平均值（精确至1 mm）。

（2）将试样平放在加压板中央，垂直于受压面加荷，加荷应均匀平稳，不得发生冲击或振动。加荷速度为2～6 KN/s为宜，直至试件破坏为止，记录最大破坏荷载 P。

5. 试验结果的计算

（1）每块试样的抗压强度 R_p 按下式计算，精确至0.1 MPa.

$$R_p = \frac{P}{LB}$$

式中 R_p——抗压强度，MPa；

P——最大破坏荷载，N；

L——受压面（连接面）的长度，mm；

B——受压面（连接面）的宽度，mm。

（2）平均值的计算

$$\overline{R} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_i}{10}$$

6. 强度等级的确定

烧结空心砖的强度等级采用平均值－最小值方法评定。它是在进行抗压强度试验后，分别获得5块砖的大面抗压强度和5块砖的条面抗压强度。根据各自抗压强度平均值 $\overline{f}$、单块最小抗压强度值 f_{min}，参考表10－5判定其强度等级，或检验此砖是否达到规定的强度等级要求。

二、烧结多孔砖试验

（一）取样方法

1. 外观质量检验的试样采用随机抽样法，在每一检验批的产品垛中抽取，抽样前预先

确定好抽样方案。

2．其它检验项目的样品用随机抽样法从外观质量检验后的样品中抽取。

3．抽样数量按试表 5－2 进行。

抽样数量　　试表 5－2

序　号	检验项目	抽样数量（块）
1	外观质量	50（$n_1=n_2=50$）
2	尺寸偏差	20
3	强度等级	10
4	孔型孔洞率及孔洞排列	5
5	泛霜	5
6	石灰爆裂	5
7	吸水率与饱和系数	5
8	冻融	5

（二）烧结多孔砖抗压强度试验

1．目的

学会烧结多孔砖抗压强度试验方法，并通过测试的抗压强度，确定砖的标号。

2．主要仪器设备

压力试验机（其示值相对误差不大于±1%，其下加压板应为球铰支座，预期最大破坏荷载在量程的20%～80%之间），水平尺（规格为250～300 mm），钢直尺（分度值为1 mm）等。

3．试件制备与养护

试件制作采用坐浆法操作。

（1）将玻璃板置于试件制备台上，其上铺一张湿的垫纸，纸上铺一层厚度不超过 5 mm 的 32.5 级普通硅酸盐水泥制成稠度适宜的水泥净浆。

（2）将在水中浸泡 10～20 min 的试样平稳地坐放在受压面水泥浆上，在另一受压面上稍加压力，使整个水泥层与砖受压面相互黏结，砖的侧面应垂直于玻璃板。

（3）待水泥浆适当凝固后，连同玻璃板翻放在另一铺纸放浆的玻璃板上，再进行坐浆，用水平尺校正好玻璃板的水平。

（4）制成的抹面试件应置于不低于 10 ℃的不通风的室内养护 3 d，再进行抗压强度试验。

4．试验方法及步骤

以单块整砖沿竖孔方向加压。

（1）测量每个试件连接面或受压面的长、宽尺寸各两个，分别取其平均值（精确至 1 mm）。

（2）将试样平放在加压板中央，垂直于受压面加荷，加荷应均匀平稳，不得发生冲击或振动。加荷速度为 2～6 KN/s 为宜，直至试件破坏为止，记录最大破坏荷载 P。

5．试验结果的计算

(1) 每块试样的抗压强度 R_p 按下式计算，精确至 0.1 MPa.

$$R_p = \frac{P}{LB}$$

式中 R_p——抗压强度，MPa；

P——最大破坏荷载，N；

L——受压面（连接面）的长度，mm；

B——受压面（连接面）的宽度，mm。

(2) 平均值的计算

$$\overline{R} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_i}{10}$$

6. 强度等级的确定

(1) 抗压强度试验后按以下式子分别计算出强度变异系数 δ、标准差 S。

$$\delta = \frac{S}{\overline{f}}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{10}(f_i - \overline{f})^2}$$

式中 δ——强度变异系数，精确至 0.01；

S——10 块试样的抗压强度标准差，精确至 0.01 MPa；

$\overline{f}$——10 块试样的抗压强度平均值，精确至 0.01 MPa；

f_i——单块试样抗压强度测定值，精确至 0.01 MPa；

(2) 结果计算与评定

a. 平均值—标准值方法评定

变异系数≤0.21 时，按表 10－5 中抗压强度平均值 $\overline{f}$、强度标准值 f_K 指标评定砖的强度等级，精确至 0.01 MPa。

样本量 n＝10 时的强度标准值按下式计算：

$$f_K = \overline{f} - 1.8S$$

式中 ——强度标准值，精确至 0.01 MPa。

b. 平均值—最小值方法评定

变异系数≥0.21 时，按表 10－5 中抗压强度平均值、单块最小抗压强度值评定砖的强度等级，精确至 0.01 Ma。

c. 试验结果鉴定

将以上所得的强度平均值和强度标准值对照表 10－5，从而判定砖的等级或判定此砖是否达到强度等级要求。

试验六　石灰有效氧化钙和氧化镁含量试验

一、目的

通过本次试验，熟练掌握测定石灰中有效氧化钙、氧化镁含量的一般方法（俗成蔗糖法）。

石灰中有效氧化钙是指活性游离的氧化钙。它不同于总钙量，因为有效氧化钙不包括碳酸钙、硅酸钙以及其它钙盐中的钙。石灰中有效氧化钙含量，是指能溶解于蔗糖溶液中，并能与蔗糖作用而生成蔗糖钙的氧化钙含量占原试样的质量百分率。原理是活性游离氧化钙与蔗糖化合成在水中溶解度较大的蔗糖钙，而其它钙盐则不与蔗糖作用，故利用不同的反应条件，用已知浓度的盐酸进行滴定（用酚酞指示剂），根据盐酸达到终点时的耗量，可以计算出有效 CaO 的含量。氧化镁的滴定方法是用 EDTA 络合滴定法。先测定钙镁合量，然后测定出钙含量与钙镁合量的差值，通过计算确定氧化镁的含量。石灰的质量主要决定于有效氧化钙和氧化镁含量，它们的含量愈高，则石灰黏结性愈好。

二、仪具试剂

（一）试验仪具

1. 筛子：0.15 mm，1 个。
2. 烘箱：50～250 ℃，1 台。
3. 干燥器：φ25 cm，1 个。
4. 称量瓶：φ30 mm×50 mm，10 个。
5. 瓷研钵：φ12～13 cm，1 个。
6. 分析天平；万分之一，1 台。
7. 架盘天平；感量 0.1 g，1 台。
8. 电炉；1 500 W，1 个。
9. 石棉网：20 cm×2 cm，1 块。
10. 玻璃珠：φ3 mm，一袋（0.25 kg）。
11. 木塞三角瓶：250 ml，20 个。
12. 漏斗：短颈，3 个。
13. 塑料洗瓶，1 个。
14. 塑料桶：20 L，1 个。
15. 下口蒸馏水瓶：5 000 ml，1 个。
16. 三角瓶：300 ml，10 个。
17. 容量瓶：250 ml、1 000 ml，各 1 个。
18. 量筒：200 ml、100 ml、50 ml、5 ml 各 1 个。
19. 试剂瓶：250 ml、1 000 ml，各 5 个。
20. 塑料试剂瓶：1 L，1 个。
21. 烧杯：50 ml，5 个；250 ml（或 300 ml），10 个。
22. 棕色广口瓶：60 ml，4 个；250 ml，5 个。
23. 滴瓶：60 ml，3 个。
24. 酸滴定管：50 ml，2 支。
25. 滴定台及滴定管夹，各一套。
26. 大肚移液管：25 ml、50 ml，各 1 支。
27. 表面皿：7 cm，10 块。
28. 玻璃棒：8 mm×250 mm 及 4 mm×180 mm 各 10 支。
29. 试剂勺：5 个。
30. 吸水管：8 mm×150 mm，5 支。

31. 洗耳球：大、小各 1 个。

（二）试验试剂

1. 盐酸：分析纯。

2. 蔗糖：分析纯。

3. 酚酞：优级纯。

4. 酒石酸钾钠：分析纯。

5. 氯化氨：分析纯。

6. 氢氧化氨：分析纯。

7. 三乙醇胺：分析纯。

8. 酸性络兰 K：优级纯。

9. 萘酚绿 B：优级纯。

10. 钙指示剂（钙试剂羧酸钠盐）：分析纯。

11. 氯化钠：分析纯。

12. 氢氧化钠：分析纯。

13. 乙二胺四乙酸二钠盐（Na_2EDTA）：分析纯。

14. 无水碳酸钠：保证试剂（标定 HCL）用。

15. 碳酸钙：优级纯（标定 EDTA）用。

16. 无水乙醇：分析纯。

17. 精密试纸：pH=9.5～13.0

三、试剂标定

（一）测定有效氧化钙试剂的配制

1. 酚酞指示剂：称取 0.5 g 酚酞溶于 50 ml 95%乙醇中。

2. 0.1%甲基橙水溶液：称取 0.05 g 甲基橙溶于 50 ml 蒸馏水中。

3. 0.5 N 盐酸标准溶液：将 42 ml 浓盐酸（比重 1.19）稀释至 1 L。按下述方法标定其当量浓度后备用。

称取约 0.800～1.000 g（准确至 0.000 2 g）已在 180 ℃烘干 2 h 的碳酸钠，置于250 ml 锥形瓶中，加 100 ml 水使其完全溶解；然后加入 2～3 滴 0.1%甲基橙指示剂，用待标定的盐酸标准溶液滴定，至碳酸钠溶液由黄色变为橙红色；将溶液加热至沸，并保持微沸3 min，然后放在冷水中冷却至室温，如此时橙红色变为黄色，则再用盐酸标准溶液滴定，至溶液出现稳定橙红色时为止。

盐酸标准溶液的当量浓度按下式计算：

$$N = \frac{m}{V \cdot 0.053} \qquad (11-21)$$

式中 N——盐酸标准溶液当量浓度；

m——称取碳酸钠的质量，(g)；

V——滴定时消耗盐酸标准溶液的体积，(ml)。

（二）测定氧化镁用试剂的配制

1. 1∶10 盐酸：将 1 体积盐酸（相对密度 1.19）用 10 体积蒸馏水稀释。

2. 氢氧化铵—氯化铵缓冲溶液（pH—10）：将 67.5 g 氯化铵溶于 300 ml *新煮沸后冷却*的蒸馏水中，加浓氢氧化铵（相对密度为 0.90）570 ml，然后用水稀释至 1 000 ml。

3. 酸性铬兰K—萘酚绿B（1:2.5）混合指示剂：称取0.3 g酸性铬兰K和0.75 g萘酚绿B与50 g已在105 ℃烘干的硝酸钾混合研细，保存于棕色广口瓶中。

4. EDTA二钠标准溶液：将10 gEDTA二钠溶于温热蒸馏水中，待全部溶解并冷至室温后，用水稀释至1 000 ml。

5. 氧化钙标准溶液：精确称取1.784 8 g在105 ℃烘干（2 h）的碳酸钙（优级纯），置于250 ml烧杯中，盖上表面皿，从杯嘴缓慢滴加1:10盐酸100 ml，加热溶解，待溶液冷却后，移入1 000 ml的容量瓶中，用新煮沸冷却后的蒸馏水稀释至刻度摇匀，此溶液每毫升相当于1 mg氧化钙。

6. 20%氢氧化钠溶液：将20 g氢氧化钠溶于80 ml蒸馏水中。

7. 钙指示剂：将0.2 g钙试剂羟酸钠和20 g已在105 ℃烘干的硫酸钾混合研细，保存于棕色广口瓶中。

8. 10%酒石酸钾钠溶液：将10 g酒石酸钾钠溶于90 ml蒸馏水中。

9. 三乙醇胺（1:2）溶液：将1体积三乙醇胺以2体积蒸馏水稀释摇匀。

（三）EDTA标准溶液与氧化钙和氧化镁关系的标定

精确吸取50 ml氧化钙标准溶液放于300 ml锥形瓶中，用水稀释至100 ml左右，然后加入钙指示剂约0.1 g，以20%氢氧化钠溶液调整溶液碱度到出现酒红色，再过量加3～4 ml。然后以EDTA二钠标准液滴定，至溶液由酒红色变成纯蓝色时为止。

EDTA二钠标准溶液对氧化钙滴定度按下式计算：

$$T_{CaO} = \frac{C \cdot V_1}{V_2}$$

式中 T_{CaO}——EDTA标准溶液对氧化钙的滴定度，即1 ml EDTA标准溶液相当于氧化钙的毫克数；

C——1 ml氧化钙标准溶液含有氧化钙的毫克数等于1；

V_1——吸取氧化钙标准溶液体积，(ml)；

V_2——消耗EDTA标准溶液体积，(ml)。

EDTA二钠标准溶液对氧化镁的滴定度（T_{MgO}），即1 ml EDTA二钠标准液相当于氧化镁的毫克数按下式计算：

$$T_{MgO} = \frac{40.31}{56.08} \cdot T_{CaO} = 0.72\ T_{CaO}$$

（四）试验方法

1. 有效钙含量的测定（中和法）

（1）将石灰试样粉碎，通过1 mm筛孔用四分法缩分为200 g，再用研钵磨细通过0.1 mm筛孔，用四分法缩分为10 g左右。

（2）将试样在105～110 ℃的烘箱中烘干2～3 h，然后移于干燥器冷却。

（3）用称量瓶按减量法称取试样约0.3 g（准确至0.5 mg）移于干燥的250 ml的锥形瓶中，迅即加入蔗糖约5 g盖于试样表面（以减少试样与空气接触），同时加入玻璃珠15～20粒。接着即加入新煮沸并已冷却的蒸馏水40～50 ml，立即加盖瓶塞，并强烈摇荡15 min（注意时间不宜过短）。如试样结块或出现粘于瓶壁现象，则应重新取样重做。

（4）摇荡后开启瓶塞，用盛有新煮并已冷却蒸馏水的洗瓶冲洗，将瓶塞和瓶内壁粘附物洗入溶液中。加入酚酞指示剂2～3滴，溶液即呈现粉红色，然后用盐酸标准溶液滴定。在

滴定时应读出滴定管初读数，然后以 2～3 滴/s 的速度滴定，直至粉红色消失。如在 30 s 内仍出现红色，应再补滴盐酸以中和，最后记录盐酸标准溶液耗用体积（V）。

2. 氧化镁含量的测定（络合法）

（1）采用与有效钙测定相同的方法，用称量瓶称取石灰试样 0.5 g（准确至 0.5 mg），移于 250 ml 的烧杯中，用蒸馏水湿润，并加 30 ml 1∶10 的盐酸，用表面皿盖着烧杯，在煤气炉（或电炉）上加热近沸并保持微沸 8～10 min，使其溶解、酸化。然后，用吸管取蒸馏水冲洗表面皿，洗液冲入烧杯中。

（2）待冷却后将烧杯内的溶液和沉淀物移入 250 ml 的容量瓶中，加蒸馏水至刻度线，仔细摇匀静置。待容量瓶中沉淀物沉淀后，用移液管吸取 25 ml 试液置于 250 ml 的锥形瓶中，加 50 ml 蒸馏水稀释。然后，顺序加入掩蔽助剂酒石酸钾钠溶液 1 ml；掩蔽剂三乙醇胺溶液 5 ml；调节剂氨性缓冲溶液 10 ml，使试液调节至 pH 值等于 10。再加入酸性络兰 K—萘酚绿 B 指示剂约 0.1 g，此时溶液呈酒红色。最后用已知浓度（通常用 0.025 M）的 EDTA 标准溶液滴定，直至试液由酒红色变为纯蓝色即为滴定终点，记录 EDTA 溶液的耗用体积（V_1）。

（3）再从前述同一容量瓶中，用移液管吸取 25 ml 试液置于另一 250 ml 的锥形瓶中，加蒸馏水 150 ml 稀释。然后，依次加入掩蔽剂三乙醇胺溶液 5 ml；调节剂 20% 氢氧化钠5 ml，使试液调节至 pH 值≥12。再加入钙指示剂约 0.1 g，此时试液呈酒红色。最后用已知浓度（通常用 0.025 M）的 EDTA 标准溶液滴定，直至试液由酒红色转变为纯蓝色即为滴定终点，记录 EDTA 溶液的耗用体积（V_2）。

（五）结果计算

1. 石灰有效钙含量按下式计算：

$$(CaO)_{ef} = \frac{V \cdot N \cdot 0.028}{m}$$

式中 $(CaO)_{ef}$——石灰有效氧化钙含量，(%)；

V——滴定时消耗盐酸标准溶液体积，(ml)；

N——盐酸标准溶液当量浓度；

0.028——氧化钙毫克当量；

m——石灰试样质量，(g)。

2. 石灰氧化镁含量按下式计算：

$$MgO = \frac{T_{MgO}(v_1 - v_2)}{m \cdot 1/10 \cdot 1\,000} \cdot 100$$

$$= \frac{T_{MgO}(v_1 - v_2) \cdot 10}{m \cdot 1\,000} \cdot 1\,000$$

式中 MgO——石灰中氧化镁含量，(%)；

T_{MgO}——EDTA 二钠标准溶液对氧化镁的滴定度（即 1 mlEDTA 二钠标准溶液相当于对氧化镁毫摩尔数）；

v_1——滴定钙、镁含量消耗的 EDTA 二钠标准溶液体积，(ml)；

v_2——滴定钙含量消耗的 EDTA 二钠标准溶液体积，(ml)；

10——总溶液对分取溶液的体积倍数；

m——石灰试样质量，(g)。

（六）试验记录

石灰有效钙和氧化镁含量试验记录

试样编号						
试样质量	g		试样质量		g	
盐酸溶液当量浓度			EDTA 对 CaO 的滴定度			
盐酸溶液耗量	ml		EDTA 对 MgO 的滴定度			
			EDTA 耗量	滴定钙镁合量	ml	
有效氧化钙含量	%			滴定钙	ml	
			氧化镁含量		%	

试验七　沥青材料试验

主要内容：（1）沥青针入度，延度和软化点的检测；

（2）黏度及其它（演示）试验；

试验要求：（1）掌握沥青三大指标的测定方法和检测标准；

（2）熟悉石油沥青的国家标准，并依据标准和试验结果确定沥青的标号。

一、石油沥青的针入度，延度和软化点试验

针入度、延度和软化点是黏稠石油沥青最主要的技术指标，通常称为沥青的三大指标。我国现行的石油沥青标准（GB/T 494—1998、SH0522—92）和沥青路面施工及验收规范（GB 50092—96）中规定，黏稠石油沥青主要是以此三大指标为依据划分标号。

（一）石油沥青的针入度试验

1．概述

沥青的针入度是指在规定的温度条件下和相应的时间内，标准针垂直穿入试样的深度。以 1/10 mm 为单位。除非特别注明，一般规定试验温度为 25 ℃，试针尖端施加的荷载（包括标准针、针的连杆与附加砝码的质量）为 100±0.01 g，试针沉入时间为 5 s。

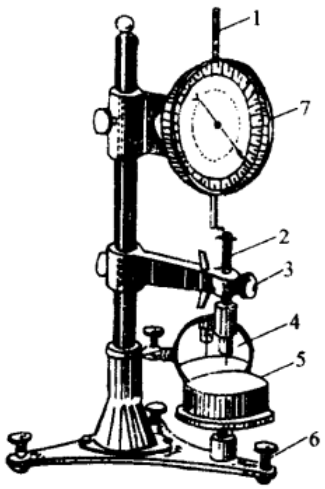
对于特殊试验，有时采用的试验温度为 0 ℃、4 ℃或 46.1 ℃，试针沉入时间为别为60 s、60 s 和 5 s，荷载分别为 200、200 和 50 g 等试验条件。

石油沥青的针入度试验主要适用于测定建筑石油沥青、道路石油沥青的针入度，液体石油沥青蒸馏或乳化沥青蒸发后残留物的针入度。

2．试验器具：

针入度仪（见试图 7－1）、标准针与针柄（硬质淬火的不锈钢制成，针与柄总质量为 2.5±0.05 g）、盛样器（有 φ55×35 mm、和 φ70×45 mm 等规格）、恒温水浴（容量不小于 10 L）、平底玻璃皿（容量不小于 0.5 L）、秒表、温度计（0～50 ℃）、金属皿或瓷杯皿、金属筛、电炉或砂浴、石棉网等。

此外，还需要三氯乙烯溶剂。



试图 7－1　沥青针入度仪

1—活动齿杆；2—连杆；3—按钮；4—标准针；5—金属试样皿；6—调平螺丝；7—刻度盘；

3. 试验准备工作

(1) 将预先除去水分的沥青试样在电炉或砂浴上加热，并搅拌使其均匀受热，温度不得超过预估软化温度以上 100 ℃，加热时间不超过 30 min，待呈流体状后过孔径 0.6 mm 的筛，筛去杂质。

(2) 将试样注入盛样皿中，试样厚度应比预计针入度大 10 mm，盖上盛样皿盖，以防落入灰尘，使其在 15～30 ℃空气中冷却 1.0～1.5 h（小试样皿）或 1.5～2 h（大试样皿）。

(3) 调整针入度仪使之水平，检查针连杆和导杆，以确认无其它外来物和摩擦。用三氯乙烯或其它合适的溶济清洗标准针并擦干。把标准针插入针柄，并将针固紧。按试验条件附加上砝码。

4. 试验步骤

(1) 取出达到恒温的盛样皿，并移入水温控制在试验温度 ±0.1 ℃的平底玻璃皿中的三脚支架上，试样表面上的水层深度不少于 10 mm。

(2) 将盛有试样的平底玻璃皿置于针入度仪的平台上。慢慢地放下针连杆，借助适当位置的反光镜或灯光反射观察，使针尖恰好与试样表面接触。拉下刻度盘的拉杆，使之与针连杆顶端轴接触，调节刻度盘或深度指示器，使指针回零。

(3) 开动秒表，在指针正指 5 s 瞬间用手紧压按钮，使标准针自由下落贯入试样，经规定时间后，停压按钮使标准针停止移动。

(4) 拉下刻度盘拉杆与针连杆顶端接触，读取刻度盘指针或深度指示器的读数，精确到 0.5，作为针入度值。

(5) 同一试样平行试验至少 3 次，各测点之间、测点与盛样皿边缘的距离不应少于 10 mm，每次试验后，应将盛有试样的平底玻璃皿放入恒温水浴，使其中水温保持试验温度。每次试验均应另换一根干净标准针，或将标准针取下，用蘸有三氯乙烯溶剂的棉花或布揩净，再用干净的棉花或布擦干。

(6) 测定针入度大于 200 的沥青试样时，至少用 3 根针，每次测定后将针留在试样中，直到 3 次测定完成后，才能把针从试样中拔出。

5. 试验精度要求

同一试样 3 次平行试验，试验结果的最大和最小值之差在试表 7－1 的允许偏差范围内时，计算 3 次试验结果的平均值，以整数作为针入度试验结果，其单位为 0.1 mm。

针入度试验结果允许偏差 **试表 7－1**

针入度值（1/10 mm）	0～49	50～149	150～249	250～350	>350
允许差值（1/10 mm）	2	4	6	8	10

若试验结果偏差值超过上表规定的最大值时，结果无效，应重做试验。

(二) 石油沥青的延度试验

1. 概述

沥青的延度是指规定形状的沥青试样，在规定的温度下，以一定的速度拉伸至拉断时的长度，单位以 cm 表示。非经注明，通常采用的试验温度为 25 ℃或 15 ℃，拉伸速度为 5 ± 0.25 cm/min。当低温时采用 1 ± 0.05 cm/min 的拉伸速度，此时应在报告中注明。

延度试验适用于测定黏稠石油沥青或液体石油沥青蒸馏试验后残留物的塑性变形能力。

2. 试验仪具和药品

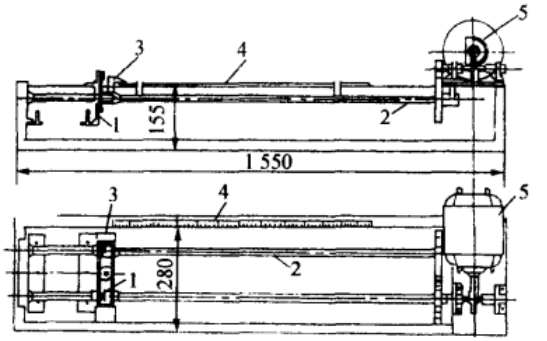
(1) 延度仪：如试图 7-2 所示。

(2) “8”字形试模：黄铜制成，由两个端模和两个侧模组成，如试图 7-3 所示。

(3) 试模底板：玻璃板或磨光的铜板，不锈钢板（表面糙度 Ra0.2 μm）。

(4) 恒温水浴（容量不小于 10 L）、温度计（0～50 ℃）、砂浴或电炉、平刮刀、石棉网。

(5) 甘油滑石粉隔离剂（甘油：滑石粉=2:1）、脱脂棉、工业酒精、食盐等。



试图 7-2 沥青延度仪

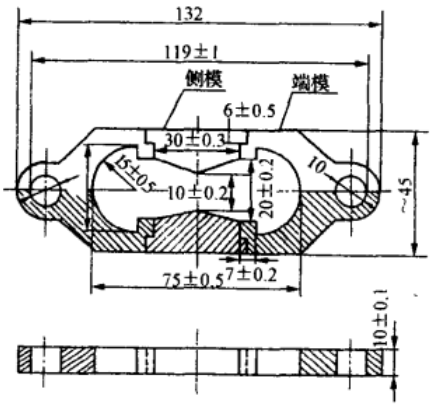
1—滑动器；2—螺旋杆；3—指针；4—标尺；5—电动机

3. 试验准备工作

(1) 将隔离剂拌和均匀，涂于金属板上及铜模侧模内表面，将“8”字模具在金属板上组装好。

(2) 按针入度试验相同的方法准备沥青试样，使试样呈细流状，自模的一端至另一端往返注入，使试样略高出模具。

(3) 试样在室温空气中冷却 30～40 min 后取出，然后放入规定的试验温度（25 ℃或15 ℃）的水浴中，保持 30 min 后取出，用热刮刀将高出试模部分的沥青刮掉，注意刮时应自模的中间向两边刮，直到与模面齐平、光滑为止。将试体连同金属板再浸入规定试验温度的水浴中 1～1.5 h。



试图 7-3 沥青延度试模

总长 74.5～75.5 mm；端模间距 29.7～30.3 mm

端模口宽 19.8～20.2 mm；最小横断面宽 0.9～10.1 mm；

厚度（全部）9.9～10.1 mm

4. 试验步骤

(1) 检查延度仪拉伸速度是否符合规定要求，移动滑板使指针正对标准尺的零点，向延度仪中注入规定温度的水，并使水面保持高于试件上表面 25 mm 以上，使水温保持在试验规定温度 ±0.5 ℃。

(2) 将保温后的试件连同底板移至延度仪的水槽中，然后将试样连同试模自底板上取下，将试模两端的孔分别套在滑板及槽端的金属柱上，去掉侧模。

(3) 启动延度仪，使试样在始终保持规定温度的温水中以 5 ± 0.25 cm/s 的速度进行拉伸，观察试样延伸情况。试验中仪器不得振动，水面不得晃动。如果发现沥青细丝上浮或沉入槽底时，则应在水中加入酒精或食盐水调整水的密度，使水溶液的密度与试样密度相近后再重新进行试验。

(4) 试样拉断时指针所指标尺上的读数即为试样的延度值，并以 cm 为单位。

5. 试验结果

(1) 正常情况下，试样拉断后是锥尖状，实际断口横断面应接近为零。如果与上述结果差异较大，应在报告中注明。

(2) 同一试样，每次平行试验不少于 3 个，如果 3 个测定结果均大于 100 cm，试验结果

记作大于 100 cm；特殊需要也可以分别记录实测值。如果 3 个测定结果中，有一个以上的测定值小于 100 cm 时，且最大值或最小值与平均值之差满足重复性试验精度要求，则取 3 个测定结果平均值的整数作为延度试验结果；若平均值大于 100 cm，记作大于 100 cm。若最大值或最小值与平均值不符合重复性试验精度要求时，应重做试验。

（3）精确度：当试验结果小于 100 cm 时，重复性试验的允许偏差为平均值的 10%；再现性试验的允许偏差为平均值的 20%。

（三）沥青软化点试验

1．概述

测定沥青软化点的方法有“环与球法”和“水银法”两种，目前我国现行的方法为“环与球法”。

“环与球法”软化点是指沥青试样浇注并粘附在规定尺寸的铜环内，试样上放置一规定尺寸和质量的钢球，并在水（或甘油）中以 5±0.5 ℃/min 的加热速度加热。沥青试样受热后，会逐渐软化并在钢球重力的作用下使试样下垂，当试样下垂达到规定距离（25.4 mm）时的温度，就定义为软化点，其单位以℃表示。

此方法适用于测定建筑石油沥青、道路石油沥青、煤沥青的温度稳定性，液体石油沥青蒸馏或乳化沥青蒸发后残留物的温度稳定性。

2．试验器具

（1）软化点试验仪：由烧杯、支架、试样杯、钢球、钢球定位器和温度计组成，如试图（7-4）所示。

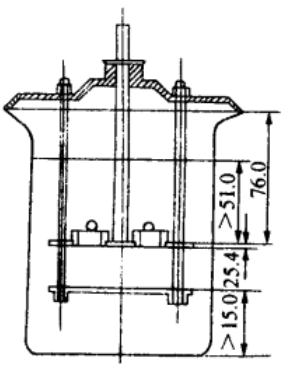
（2）电炉或酒精灯、金属板、恒温水槽、平直刮刀、环夹、筛网、温度计（0～80 ℃或 0～200 ℃）、石棉网。

3．试验准备工作

（1）将试样环置于涂有甘油滑石隔离剂的金属板或玻璃板上，按针入度制备试样的方法制备沥青试样，然后将流态的沥青徐徐注入试样环内至略高于环面为止。

（2）当试样软化点高于 120 ℃时，应将试样环和金属底板（不得用玻璃板）预先加热至 80～100 ℃。

（3）试样在室温冷却 30 min 后，并用热刮刀刮除环面上高出的多余试样（使之与环上口平齐）。



试图7-4
沥青环与球法软化点仪

4．试验步骤

（1）试样软化点在 80 ℃以下者：

①将装有试样的试样环连同试样底板置于装有 5±0.5 ℃的保温槽水中至少 15 min；同时将金属支架、钢球、钢球定位环等也置于相同水槽中。

②向烧杯内注入新煮沸并冷却到 5 ℃的蒸馏水，水面略低于立杆上的刻度标记。

③从保温槽水中取出盛有试样的试样环，并放置在支架中层板的圆孔中，套上定位环；将整个环架放入烧杯中，调整水面至刻度标记，保持水温为 5±0.5 ℃（注意，环架上任何部分不得附有气泡）。将 0～80 ℃的温度计由上层板中心孔垂直插入，使端部测温头与试样环下面平齐。

④将盛有水和环架的烧杯移至放有石棉网的加热炉具上，然后将钢球放在定位环中间试样上表面的中央，立即加热，使杯中水温在 3 min 内维持每分钟升温 5±0.5 ℃（注意：在

加热过程中，如温度上升超出此范围时，应重做试验）。

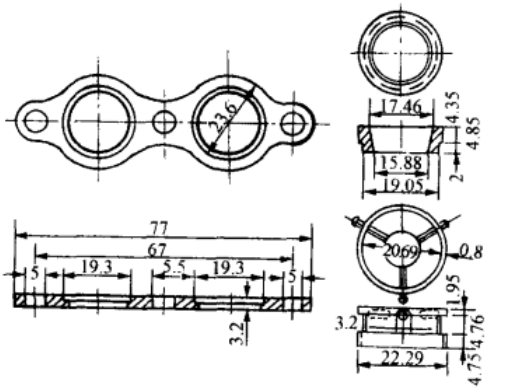
⑤试样受热软化逐渐下坠，至与下层底板表面接触时，立即读取温度，精确至0.5℃。

（2）试样软化点在80℃以上时：

①将装有试样的试样环连同试样底板置于装有32±1℃甘油的保温槽中，同时将金属支架、钢球、钢球定位环等也置于甘油中，恒温15 min。

②在烧杯内注入预先加热到32℃的甘油，其液面略低于立杆上的刻度标记。

③从保温槽中取出装有试样的试样环，按（1）中的试验方法进行测定，读取温度精确至0.5℃。



试图7-5　软化点仪部件图

（a）试验架　（b）试样环　（c）钢球定位器

5．试验结果

（1）同一试样平行试验两次，当两次测定值的差值符合重复性试验精度要求时，取其平均值作为软化点试验结果，精确至0.5℃。

（2）精度的允许偏差

当试样软化点小于80℃时，重复性试验的允许差为2℃，再现性试验的允许差为80℃。

二、沥清黏度（根据需要可以作为演示实验）

（一）概述：

沥青的标准黏度是沥青试样在规定温度条件下，自标准黏度计规定直径的流孔流出50 ml所需的时间，以s表示。

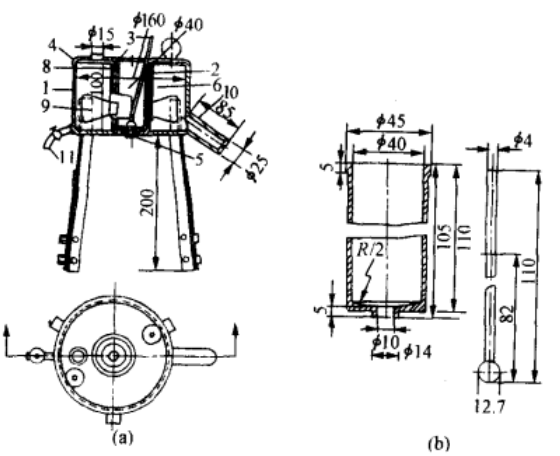
依据我国现行标准，液体沥青和软煤沥青按照标准黏度划分标号，黏度值愈大，表示沥青愈黏稠，其标号也愈高。

（二）试验器具与药品

沥青黏度仪（见试图7-6）主要包括盛样管、球塞、保温水浴、保温水浴盖及搅拌器、温度计（0～100℃）、量筒、秒表、盛样锅（50 ML）、滤网筛（筛孔0.3～0.5 mm）、煤气灯或酒精灯、肥皂水或矿物油、苯或其它有机溶剂。

（三）试验准备工作

1．按要求准备好沥青试样，根据沥青的种类和稠度选择符合规定流孔孔径的盛样管，并将盛样管置于水浴圆井中。用规定的球塞堵好流孔，流孔下放一盛样皿以备接受不慎流出的试样。对流孔直径不大于5.0 mm盛样管，应采用直径为6.35 mm的球塞。



试图7-6　沥青黏度仪

1—水浴；2—搅拌器套筒；3—球塞；4—盖；5—流孔；6—圆井；7—试样筒突肩；8—试样筒；9—搅拌叶片；10—加热管；11—放水龙头

2．根据试验要求，调整保温水浴内的温度至试验所需温度±0.1 ℃，并将其与加热管连接，使热水流进行正常加热循环。

（四）试验步骤

1．将试样加热至比试验温度高2～3 ℃（如试验要求温度低于室温时，试样须冷却至比试验温度低2～3 ℃），并注入盛样管，其数量以液面达到塞杆垂直时杆上的标记时为宜。

2．先使试样在水浴中保持试验温度至少30 s，用温度计搅拌试样，测量试样的温度为试验温度±0.1 ℃时，调整试样液面至球塞杆的标记处，再继续保温1～3 min。

3．将流孔下盛样皿移出，放置接样瓶或量筒，使其中心正对流孔。接样瓶或量筒可预先注入肥皂水或矿物油25 ml，以利洗涤及读数准确。

4．提起球塞，将标记悬挂在试样管边上，待试样流入接样瓶或量筒达25 ml（即加上矿物油或肥皂水的总体积为50 ml）时，启动秒表，待试样流出75 ml（量筒刻度100 ml）时，按停秒表。

5．记取试样流出50 ml所经过的时间，以秒记，即为试样的黏度值。

（五）试验结果

1．同一试样至少平行试验两次，当两次测定的差值不大于平均值的4%时，取其平均值的整数作为试验结果。重复性试验精度的允许差为平均值的4%。

2．试验记录：沥青黏度试验记录如试表7－2。

沥青黏度试验记录表　　试表7－2

试样名称		试样来源			
试样编号	沥青第　　号	材料用途			
试验次数	流孔直径（mm）	水浴恒温温度（℃）	试验时试样温度（℃）	量筒中肥皂水量（mL）	试样流出50 mL所用时间Ctd（s）
1					
2					

试验者：　　日期：　　复核：　　日期：

试验八　沥青混合料试验

主要内容：（1）沥青混合料的制备和物理指标测定；（2）马歇尔稳定度试验；（3）沥青混合料车辙试验（自选演示）试验。

试验要求：（1）掌握沥青混合料的制备方法；（2）掌握物理常数、马氏稳定度、流值和残留稳定度的测定方法。

一、沥青混合料的制备和物理指标测定

我国现行国家标准《沥青路面施工及验收规范》（GBJ 92—93）规定，热拌沥青混合料配合比设计采用马歇尔稳定度法。该法是首先应按配比设计拌制沥青混合料，然后制成规定尺寸的试件。试件经12 h后，测定其物理指标（包括：表观密度、空隙率、沥青饱和度、矿料间隙率等），最后测定其稳定度、流值和残留稳定度。在必要时，还要进行动稳定校核。

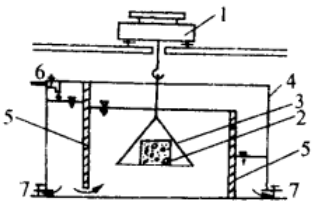
（一）沥青混合料的制备和试件成型

1．概述

沥青混合料的制备和试件成型，是按照设计的配合比，应用现场实际材料，在试验室内用小型拌和机，按规定的拌制温度制备成沥青混合料；然后将这种混合料放在规定的成型温度下，用击实法制成直径为 101.6 mm、高为 63.5 mm 的圆柱体试件，供测定其物理常数和力学性质用。

2. 试验器具：

击实仪、标准击实台、试验室用沥青混合料拌和机、脱模器、试模、烘箱、天平或电子秤、沥青运动黏度测定设备、插刀或大螺丝刀、温度计及其它；电炉或煤气炉、沥青熔化锅、拌和铲、试验筛、滤纸（或普通纸）、胶布、卡尺、秒表、粉笔、棉纱等。



试图 8－1　溢流水箱及下挂法水中重称量方法示意图

1—浸水天平秤；2—试件；3—网篮；4—溢流水箱；5—水位搁板；6—注入口；7—放水阀门

3. 试验方法

（1）准备工作

①确定制作沥青混合料试件的拌和与压实温度。

用毛细管黏度计测定沥青的运动黏度，绘制黏温曲线。当使用石油沥青时，以运动黏度为 170 ± 200 mm^2/s时的温度为拌和温度；以 280 ± 30 mm^2/s 时的温度为压实温度。亦可用赛氏黏度计测定赛波特黏度，以 85 ± 10 ℃时的温度为拌和温度；以 140 ± 15 ℃时的温度为压实温度。

当缺乏运动黏度测定条件时，试件的拌和与压实温度可按试表 8－1 选用，并根据沥青品种和标号作适当调整。针入度小、稠度大的沥青取高限，针入度大、稠度小的沥青取低限，一般取中值。

沥青混合料的拌和及压实温度参考表　　试表 8－1

沥青种类	拌和温度（℃）	压实温度（℃）	沥青种类	拌和温度（℃）	压实温度（℃）
石油沥青	130～160	110～130	煤沥青	90～120	80～110

②将各种规格的矿料置 105 ± 5 ℃的烘箱中烘干至恒重（一般不少 4～6 h）。根据需要，将粗细集料过筛后，用水冲洗再烘干备用。

③分别测定不同粒径粗、细集料及填料（矿粉）的表观密度，并测定沥青的密度。

④将烘干分级的粗细集料，按每个试件设计级配成分要求称其质量，在一金属盘中混合均匀，矿粉单独加热，置烘箱中预热至沥青拌和温度以上约 15 ℃（石油沥青通常为 163 ℃）备用。一般按一组试件（每组 3～6 个）备料，但进行配合比设计时宜一个一个分别备料。

⑤将沥青试样，用电热套或恒温烘箱熔化加热至规定的沥青混合料拌和温度备用。

⑥用沾有少许黄油的棉纱擦净试模、套筒及击实座等置 100 ℃左右烘箱中加热 1 h 备用。

（2）混合料拌制

①将沥青混合料拌和机预热至拌和温度以上 10 ℃左右备用。

②将每个试件预热的粗细集料置于拌和机中，用小铲适当混合，然后再加入需要数量的已加热至拌和温度的沥青，开动拌和机一边搅拌，一边将拌和叶片插入混合料中拌和 1～

1.5 min，然后暂停拌和，加入单独加热的矿粉，继续拌和至均匀为止，并使沥青混合料保持在要求的拌和温度范围内。标准的总拌和时间为 3 min。

（3）试件成型

①将拌好的沥青混合料，均匀称取一个试件所需的用量（约 1 200 g）。当一次拌和几个试件时，宜将其倒入经预热的金属盘中，用小铲拌和均匀分成几份，分别取用。

②从烘箱中取出预热的试模及套筒，用沾有少许黄油的棉纱擦拭套筒、底座及击实锤底面，将试模装在底座上（也可垫一张圆形的吸油性小的纸），按四分法从四个方向用小铲将混合料铲入试模中，用插刀沿周边插捣 15 次，中间 10 次。插捣后将沥青混合料表面整平成凸圆弧面。

③插入温度计，至混合料中心附近，检查混合料温度。

④待混合料温度符合要求的压实温度后，将试模连同底座一起放在击实台上固定（也可在装好的混合料上垫一张吸油性小的圆纸），再将装有击实锤及导向棒的压实头插入试模中，然后开启马达（或人工）将击实锤从 457 mm 的高度自由落下击实规定的次数（75、50 或 35 次）。

⑤试件击实一面后，取下套筒，将试模掉头、装上套筒，然后以同样的方式和次数击实另一面。

⑥试件击实结束后，如上下面垫有圆纸，应立即用镊子取掉，用卡尺量取试件离试模上口的高度并由此计算试件高度，如高度不符合要求时，试件应作废，并按下式调整试件的混合料数量，使高度符合 63.5±1.3 mm 的要求。

$$q = q_0 \cdot \frac{63.5}{h_0}$$

式中 q——调整后沥青混合料用量，(g)；

q_0——制备试件的沥青混合料实际用量，(g)；

h_0——制备试件的实际高度，(mm)。

⑦卸去套筒和底座，将装有试件的试模横向放置冷却至室温后，置脱模机上脱出试件。将试件仔细置于干燥洁净的平面上，在室温下静置过夜（12 h 以上）供试验用。

（二）沥青混合料物理指标测定

1. 概述

按击实法制成的沥青混合料圆柱体，经 12 h 以后，测定其表观密度。并按组成材料原始数据计算其空隙率、沥青体积百分率、矿料间隙率和沥青饱和度等物理指标。

2. 试验仪具

浸水天平或电子秤、网篮、溢流水箱、试件悬吊装置、秒表、电扇或烘箱。

3. 试验方法（水中重法测混合料表观密度——适于空隙率小的密级配沥青混合料）

（1）选择适宜的浸水天平（或电子秤），最大称量应不小于试件质量的 1.25 倍，且不大于试件质量的 5 倍。

（2）除去试件表面的浮粒，称取干燥试件在空气中质量（m_a）（准确度根据选择的天平的感量决定，通常为 5 g）。

（3）挂上网篮浸入溢流水箱的水中，调节水位，将天平调平或复零，把试件置于网篮中（注意不要使水晃动），浸水约 1 min，称取水中质量（m_w）。

注：若天平读数持续变化，不能在数秒钟内达到稳定，说明试件吸水较严重，不适用于

此法测定，应改用表干法或封蜡法测定。

4．计算物理常数

（1）表观密度　密实的沥青混合料试件的表观密度，按下式计算，取3位小数。

$$\rho_s = \frac{m_a}{m_a - m_w} \cdot \rho_w$$

式中　ρ_s——试件的表观密度，(g/cm^3)；

m_a——干燥试件的空中质量，(g)；

m_w——试件的水中质量，(g)；

ρ_w——常温水的密度（≈1 g/cm^3）。

（2）理论密度

①当试件沥青按油石比 P_a 计时，试件的理论密度 ρ_t 按下式计算，取3位小数。

$$\rho_t = \frac{100 + P_A}{\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{P_2}{\gamma_2} + \cdots\cdots + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_a}{\gamma_a}} \cdot \rho_w$$

②当沥青按沥青含量 P_b 计时，试件的理论密度 ρ_t 按下式计算：

$$\rho_t = \frac{100}{\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{P_2}{\gamma_2} + \cdots\cdots + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_a}{\gamma_a}} \cdot \rho_w$$

式中　ρ_t——理论密度，(g/cm^3)；

$P_1 \cdots\cdots P_n$——各种矿料的配合比（矿料与沥青之和为）；$\sum_1^n P_i = 100$

$P'_1 \cdots\cdots P'_n$——各种矿料的配合比（矿料总和为）；$\sum_1^n P'_i + P_b = 100$

$\gamma_1 \cdots\cdots \gamma_n$——各种矿料与水的相对密度；

注：矿料与水的相对密度通常采用表观相对密度，对吸水率大于1.5%的粗集料可采用表观相对密度与表观相对密度的平均值。

P_a——油石比（沥青与矿料的质量比），(%)；

P_b——沥青含量（沥青质量占沥青混合料叫质量的百分率），(%)；

γ_b——沥青的相对密度，(25/25 ℃)。

（3）空隙率　试件的空隙率按下式计算，取1位小数。

$$VV = (1 - \rho_s/\rho_t) \cdot 100$$

式中：VV——试件的空隙率，(%)；

ρ_t——理论密度，(g/cm^3)；

ρ_s——试件的视密度，(g/cm^3)。

（4）沥青体积百分率　试件中沥青的体积百分率，取1位小数。

$$VA = \frac{P_b \cdot \rho_s}{\gamma_b \cdot \rho_w}$$

$$VA = \frac{100 \cdot P_b \cdot \rho_s}{(100 + P_a) \cdot \gamma_b \cdot \rho_w}$$

式中　VA——沥青混合料试件的沥青体积百分率，(%)。

（5）矿料间隙率　试件的矿料间隙率按下式计算，取1位小数。

$$VMA = VA + VV$$

式中　VMA——沥青混合料试件的矿料间隙率（%）。

（6）沥青饱和度　试件沥青饱和度按下式计算，取1位小数。

$$VFA = \frac{VA}{VA + VV} \times 100$$

式中　VFA——沥青混合料试件的沥青饱和度（%）。

5．试验记录

沥青混合料物理指标的试验结果，记录于沥青混合料马歇尔稳定度试验记录表试表8-2中。

二、沥青混合料马歇尔稳定度试验

（一）概述

马歇尔稳定度试验是对标准击实的试件在规定的温度和加荷速度条件下受压，测定沥青混合料的稳定度和流值等指标所进行的试验。

本方法适用于标准马歇尔稳定度试验和浸水马歇尔稳定度试验。标准马歇尔稳定度试验主要用于沥青混合料的配合比设计及沥青路面施工质量检验。浸水马歇尔稳定度试验（根据需要，也可进行真空饱水马歇尔试验）主要是检验沥青混合料受水损害时抵抗剥落的能力，通过测试其水稳定性检验配合比设计的可行性。

该方法使用的沥青混合料试件可按试验规程T0702方法制作，其标准的试件尺寸为直径ϕ101.6±0.25 mm，高63.5±1.3 mm的圆柱体。

（二）试验仪具

沥青混合料马歇尔试验仪：符合国家标准《沥青混合料马歇尔试验仪》（GB/T 11823）技术要求的产品，也可采用带数字显示或用X－Y记录荷载-位移的自动马歇尔试验仪。试验仪最大荷载不小于25 kN，测定精度100 N，加载速率能保持50±5 mm/min，有测定荷载与试件变形的压力环（或传感器）、流量计（或位移计），钢球直径16 mm，上下压头曲度半径为50.8 mm。

其次还有：恒温水槽、真空饱水容器、烘箱、天平、温度计、马歇尔试件高度测定器、卡尺、棉纱、黄油等。

（三）试验方法

1．标准马歇尔试验方法

（1）用卡尺（或试件高度测定器）测量试件直径和高度（如试件高度不符合63.5±1.3 mm要求或两侧高度差大于2 mm时，此试件应作废），并按试验七的方法测定试件的物理指标。

（2）将恒温水槽（或烘箱）调节至要求的试验温度，对黏稠石油沥青混合料加热为60±1 ℃。将试件置于已达规定温度的恒温水槽（或烘箱）中保温30～40 min，试件应垫起，离容器底部不小于5 cm。

（3）将马歇尔试验仪的上下压头放入水槽（或烘箱）中达到同样温度。将上下压头从水槽（或烘箱）中取出拭干内面。为使上下压头滑动自如，可在下压头的导棒上涂少量黄油。再将试件取出置于下压头上，盖上上压头，然后装在加载设备上。

（4）将流值测定装置安装在导棒上，使导向套管轻轻地压住上压头，同时将流值计读数调零。在上压头的球座上放妥钢球，并对准荷载测定装置（应力环或传感器）的压头，然后调整应力环中百分表对准零或将荷重传感器的读数复位为零。

(5) 启动加载设备，使试件承受荷载，加载速度为 50 ± 5 mm/min。当试验荷载达到最大值的瞬间，取下流值计，同时读取应力环中百分表（或荷载传感器）读数和流值计的流值读数（从恒温水槽中取出试件至测出最大荷载值总的时间，不应超过 30 s）。

(6) 试验结果和计算

稳定度及流值

马歇尔模数　试件的马歇尔模数按下式计算

$$T = \frac{MS \cdot 10}{FL}$$

式中　T——试件的马歇尔模数（kN/mm）

MS——试件的稳定度（kN）

FL——试件的流值（0.1 mm）

(7) 试验结果报告

①当一组测定值中某个数据与平均值大于标准差 k 倍时，该测定值应予舍弃，并以其测定值的平均值作为试验结果。当试验项目 n 为 3、4、5、6 时，k 值分别为 1.15、1.46、1.67、1.82。

②试验应报告马歇尔的稳定度、流值、马歇尔模数，以及试件尺寸、试件的密度空隙率、沥青用量、沥青体积百分比、沥青饱和度、矿料间隙率等各项物理指标。

2. 浸水马歇尔试验方法

(1) 浸水马歇尔试验方法是将沥青混合料试件，在规定温度（黏稠沥青混合料为 60 ± 1 ℃）的恒温水槽中保温 48 h，然后测定其稳定度。其余方法与标准马歇尔试验方法相同。

(2) 根据试件的浸水马歇尔稳定度，可按下式求得试件浸水残留稳定度。

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \cdot 100$$

式中　MS_0——试件的浸水残留稳定度（%）；

MS_1——48 h 后的稳定度（kN）；

MS——试件按标准试验方法的稳定度（kN）；

3. 真空饱水马歇尔试验方法

真容饱水马歇尔试验方法，是将试件先放入真空干燥容器中，关闭进水胶管，开动真空泵，使干燥器的真空度达到 97.3 kPa（730 mmHg）以上，维持 15 min，然后打开进水胶管，靠负压进入冷水流使试件全部浸入水中，浸水 15 min 后恢复常压，取出试件再放入规定稳定度（黏稠沥青混合料为 60 ± 1 ℃）的恒温水槽中保温 48 h，进行马歇尔试验，可按下式求得试件真空饱水残留稳定度。

$$MS' = \frac{MS_2}{MS} \cdot 100$$

式中　MS'——试件的真空饱水残留稳定度（%）；

MS_2——试件真空饱水后浸水 48 h 后的稳定度（kN）

MS——试件按标准试验方法的稳定度（kN）。

4. 试验记录

沥青混合料马歇尔稳定度试验记录如试表 8-2：

沥青混合料稳定度试验记录

试表 8－2

沥青混合料用途	矿质集料品种		矿粉密度 $\rho_s(E)$(g/cm³)			拌和温度(℃)
沥青混合料类型	粗集料表现密度 $\rho'_s(C)$(g/cm³)		沥青品种			击实温度(℃)
沥青混合料配比	细集料表现密度 $\rho'_s(s)$(g/cm³)		沥青密度 $\rho'_s(\alpha)$(g/cm³)			击实次数

试件编号	沥青用量 q_s(%)	试件高度			试件在空气中重 m_0(g)	试件在水中重 m_1(g)	试件表观密度 ρ_0(g/cm³)	试件理论真密度 ρ_t(g/cm³)	试件中沥青体积百分率 VA(%)	试件空隙率 VV(%)	试件矿料空隙率 VMA(%)	沥青饱和度 VFA(%)	稳定度			流值 FL(1/10 mm)	马歇尔模数 T(kN/mm)	浸水稳定度 MS_1(kN)	残留稳定度 MS_0(%)
		个别值		平均高度 h(cm)									测力环百分表读数 1/100 mm	测力环折算系数 kN/100 mm	稳定度值 MS(kN)				
		h_1(cm)	h_2(cm)																
①	②	③	④	⑤=③+④/2	⑥	⑦	⑧=⑥/⑥-⑦	⑨	⑩=③×⑧/ρ_t(a)	(11)=(1-⑧/⑨)×100	(12)=(10)+(11)	(13)=(10)/(12)	(14)	(15)	(16)=(14)×(15)	(17)	(18)=(16)×(17)	(19)	(20)=(19)/(16)×(100)
Ⅰ-1																			
Ⅰ2																			
Ⅰ3																			
平均																			
Ⅱ-1																			
Ⅱ-2																			
Ⅱ-3																			
平均																			
Ⅲ-1																			
Ⅲ-2																			
Ⅲ-3																			
平均																			

试验者：　　日期：　　复核者：　　日期：

三、沥青混合料车辙试验

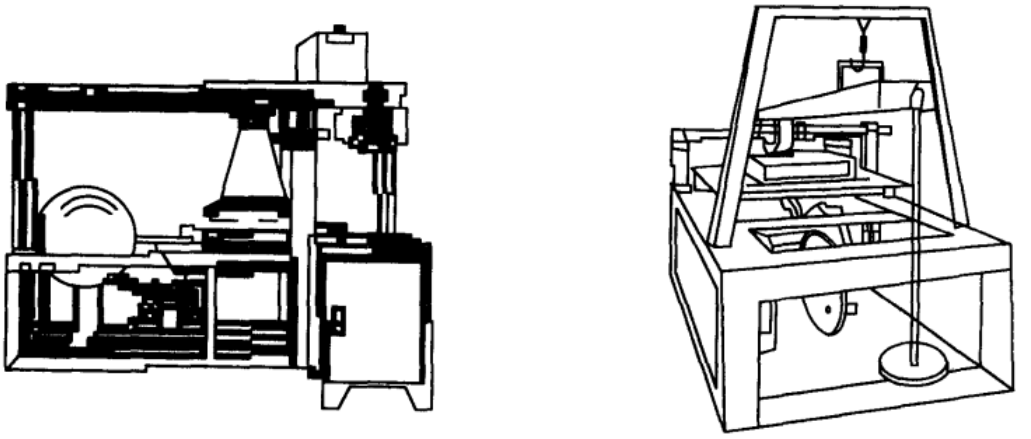
（一）概述

沥青混合料的车辙试验是在规定尺寸的板块状压实试件上，用固定荷载的橡胶轮反复行走后，测定其在变形稳定期每增加变形 1 mm 的碾压次数，即动稳定度，以“次/mm”表示。车辙试验的试验温度与轮压可根据有关规定和需要选用。非经注明，试验温度为 60 ℃，轮压为 0.7 MPa。依需要，如在寒冷地区也可采用 45 ℃或其它温度，但应在报告中注明。计算动稳定度的时间原则上为试验开始后 40～60 min 之间。

本方法适用于用轮碾成型机碾压成型的长 300 mm、宽 300 mm、厚 50 mm 的板块状试件，也适用于现场切割作长 300 mm、宽 150 mm、厚 50 mm 板块状试件。同时也适用于测定沥青混合料的高温抗车辙能力，并作为沥青混合料配合比设计的辅助性检验使用。

（二）试验器具

1. 车辙成型仪及试验机：如试图 8－2 及试图 8－3，主要由下列部分组成：



试图 8－2、试图 8－3 沥青混合料车辙成型仪及试验机示意图

（1）试件台：可牢固地安装两种宽度（300 mm 及 150 mm）的规定尺寸试件的试模。

（2）试验轮：橡胶制的实心轮胎。

（3）加载装置：使试验轮与试件的接触压强在 60 ℃时，为 0.7 ± 0.05 MPa，施加的总荷重为 700 N 左右，根据需要可以调整。

（4）试模：钢板制成由底板及侧板组成，试模内侧尺寸为 300 mm，宽为 300 mm，厚为 50 mm（试验室制作），也可固定 150 mm 宽的现场切制试件。

（5）变形测量装置：自动检测车辙变形并记录曲线装置，常用 LVDT、电测百分表或非接触位移计。

（6）温度检测装置：自动检测并记录试件表面及恒温室内温度的温度传感器、温度计，精度为 0.5 ℃。

2. 恒温室：能保持室内恒温 60 ± 1 ℃（试件内部温度 60 ± 0.5 ℃），根据需要也可为其它需要的温度，温度应能自动连续记录。

3. 台秤：称量 15 kg，感量不大于 5 g。

（三）试验准备

1. 试验轮接地压强测定：测定在 60 ℃时进行，在试验台上放置一块 50 mm 厚的钢板，

其上铺一张毫米方格纸，上铺一张新的复写纸，以规定的 700 N 荷载后试验轮静压复写纸，即可在方格纸上印出轮压面积，并由此求接地压强。高压强不符合 0.7 ± 0.05 ℃ MPa 时，荷载应予适当调整。

2. 按规程规定用轮碾成型法制车辙试验试块。在试验室或工地制备成型的车辙试件，其标准尺为 300 mm × 150 mm × 50 mm 的试件。

3. 将试件脱模按规定的方法测定密度及空隙率等各项物理指标。经水浸，应用电风扇将其吹干，然后再装回原试模中。

（四）试验步骤

1. 将试件连同试模一起，置于达到试验温度 60 ± 1 ℃ 的恒温室中，保温不少于 5 h，也不得多于 24 h。在试件的试验轮行走的部位上，粘贴一个热电隅温度计（也可在试件制作时预先将热电隅导线埋入试件一角），控制试件温度稳定在 60 ± 0.5 ℃。

2. 将试件连同试模移置于车辙试验机的试验台上，试验轮在试件中央部位，其行走方向须与试件碾压或行车方向一致。开动车辙变形自动记录仪，然后启动试验机，使试验轮往返行走，时间约 1 h，或最大变形达到 25 mm 时为止。试验时，记录仪自动记录变形曲线（如图试）及试件温度。

3. 从图中读取 45 min（t_1）及 60 mm（t_2）时的车辙变形 d_1 及 d_2，准确至 0.01 mm。当变形过大，在未试 60 min 变形已达 25 mm 时，则以达到 25 mm（d_2）时的时间为 t_2，将其前 15 min 为 t_1，此时的变形量为 d_1。

4. 沥青混合料试件的动稳定度按下式计算：

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times 42}{d_2 - d_1} \times c_1 \times c_2$$

式中 DS——沥青混合料的动稳定度，次/mm；

d_1——时间 t_1（一般为 45 min）的变形量，mm；

d_2——时间 t_2（一般为 60 min）的变形量，mm；

c_1——试验机类型修正系数，曲柄连杆驱动试件的变速分赴方式为 1.0，链驱动试验轮的高速方式为 1.5；

c_2——试件系数，试验室制备的宽 300 mm 的试件为 1.0，从路面切割的宽 150 mm 的试件为 0.8。

（五）试验结果

1. 同一沥青混合料或同一路段的路面，至少平行试验 3 个试件，当 3 个试件动稳定度变异系数小于 20% 时，取其平均值作为试验结果。变异系数大于 20% 时应分析原因，并追加试验。如计算动稳定度的值大于 6 000 次/mm 时，记作大于 6 000 次/mm。

2. 精密度或允许差

重复性试验动稳定变异系数的允许值为 2%。

试验九　石料单轴抗压强度试验

一、概述

石料单轴抗压强度是石料标准试件吸水饱和后，在单向受压状态下破坏时的极限强度。

二、试验仪具

（一）压力机（或万能试验机）：加载范围 300～200 kN。加荷速度应可调至 0.5～1.0 MPa/S。压力机（或万能试验机）吨位的选择，可根据石料试件破坏荷重而定。一般试件破坏荷载应不小于压力机最大吨位的 30%，且不大于其 80%。

（二）承压板：圆盘形钢板，硬度不低于洛氏硬度 HRC53，压板直径应大于试件直径 2 mm，压板厚度不小于 15 mm，圆盘表面应磨光，其平整度应优于 0.005 mm。两承压板之一应是环面座。

（三）石料加工全套设备：包括锯石机、钻石机、磨平机等。

（四）游标卡尺（分度值 0.1 mm）及角尺。

（五）石料吸水饱和使用的有关设备。

三、试验方法

（一）制备试件：用锯石机（或钻石机）从岩石试样（或岩芯）中制取边长 50 ± 0.5 mm 的正立方体或直径与高均为 50 ± 0.5 mm 的圆形试件，每 6 个试件作为一组。

对有显著层理的岩石，应取两组试件（即 12 个）以分别测定其垂直和平行于层理的抗压强度值。试件与压力机接触的两面，应用磨平机磨平，并保持两面互相平行。试件形状须用角尺及游标卡尺检查是否符合下述要求，试件端面平整度应为 0.02 mm，对于试件轴向的垂直度偏差不应超过 0.25。

（二）用游标卡尺量取试件尺寸（精确到 0.1 mm），对于立方体试件在顶面和底面上各量取其边长，以各个面上相互平行的两个边长的算术平均值作为宽或高，并计算面积，对于圆柱体试件在顶面和底面上各量取相互垂直的两个直径，以其算术平均值计算面积。取顶面和底面面积的算术平均值作为计算抗压强度所用的截面积。

（三）按吸水率试验方法对试件进行饱水处理，最后一次加水深度应使水面高出试件至少 20 mm。

（四）试件自由浸水 48 h 后取出擦干表面，将试件置于压力机两承压板间，球面应在试件上端面，并用矿物油稍加润滑，以致在滑块自重下仍在闭锁，试件、压板和球座精确地彼此对中，并与加载机设备对中，球座曲率中心与试件端面中心相重合。试验对施加应力速率在 0.5～1 MPa/S 的限度内。抗压试件的最大荷载记录用 N 为单位，精度 10%。

（五）石料的抗压强度按下式计算：

$$f_{sc} = \frac{F_{max}}{A_0}$$

式中 f_{sc}——石料的抗压强度（MPa）；

F_{max}——极限破坏荷载（N）；

A_0——试件的截面积（mm^2）

石料的抗压强度计算至 1 MPa。

（六）精度

取 6 个试件的算术平均值作为试验结果。为其中任意 2 个均值与其余 4 个的强度均值相差 3 倍以上时，则取试验结果相近的 4 个试件的算术平均值作为试验结果。

对具有显著层理的岩石，取垂直及平行层理的试件强度的平均值作为试验结果。

主要参考文献

1 徐家保主编. 建筑材料学（第二版）. 广州：华南理工大学出版社，1996
2 李铭臻主编. 建筑工程材料. 北京：中国建材工业出版社，1998
3 赵方冉主编. 土木建筑工程材料. 北京：中国建材工业出版社，1999
4 严家伋编. 道路建筑材料. 北京：人民交通出版社，1996
5 王世芳主编. 建筑材料. 北京：中央广播电视大学出版社，1989
6 符芳主编. 建筑材料. 南京：东南大学出版社，1995
7 龚洛书主编. 建筑工程材料手册. 北京：中国建筑工业出版社，1998
8 赵述智主编. 实用建筑材料手册. 北京：中国建筑工业出版社，1998
9 沈春林等编著. 建筑防水材料. 北京：化学工业出版社，2000
10 曹文达主编. 建筑装饰材料. 北京：北京工业大学出版社，1999
11 李永盛等编. 建筑装饰工程材料. 上海：同济大学出版社，2000